

文章编号: 2095-4980(2023)01-0050-08

## TDOA 声源定位中阵列阵型对误差的影响

杨思琪, 田杨萌, 王彩霞, 叶倩, 刘畅

(北京信息科技大学 理学院, 北京 100192)

**摘要:** 在麦克风阵列声源定位中, 不同阵列阵型及声源频率高低均对定位结果产生影响, 探讨上述不同变量对定位结果产生误差的定量分析。使用到达时间差测量(TDOA)算法, 运用 16 个麦克风分别组成十字型、同心圆、方型、L型、Y型阵列, 探讨不同形状的麦克风阵列在不同频率声源下所产生的定位误差, 并在 Matlab 上进行仿真分析, 尝试得到较为准确的声源定位结果, 提出一种误差最小的用于麦克风阵列声源定位的同心圆阵列阵型。

**关键词:** 到达时间差测量算法; 误差分析; Matlab 仿真; 麦克风阵列

中图分类号: TN953<sup>+</sup>.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020585

## Influence of array on error in TDOA sound source location

YANG Siqi, TIAN Yangmeng, WANG Caixia, YE Qian, LIU Chang

(Beijing University of Information Technology, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In the microphone array sound source localization, different microphone arrays and different source frequencies will have certain impacts on the results. In this paper, Time Difference of Arrival(TDOA) method is employed, and 16 microphones are utilized to form cross array, concentric circle array, square array, L-type array and Y-type array respectively. The positioning errors of microphone array with different shapes under different frequency sources are discussed. Simulation analysis is carried out on Matlab to obtain more accurate sound source positioning results. A concentric circle array for sound source location of microphone array is proposed, which has the smallest error.

**Keywords:** Time Difference of Arrival; error analysis; Matlab simulation; microphone array

声源定位技术在通信、雷达、医学、航天等领域有着重要作用和广阔的应用前景。基于麦克风阵列的声源定位技术是近年来一项研究热点。它是通过具有一定几何结构的麦克风阵列采集声源信号, 再对语音信号运用阵列信号处理技术进行处理和分析, 从而确定声源位置的一种方法<sup>[1]</sup>。最近几年, 声源定位系统开始与数字信号处理(Digital Signal Processor, DSP)技术、自适应信号解决技术等相结合, 科技的迅速发展使声源的精准定位成为可能, 声音定位系统也因此得到进一步的发展和完善, 并且更加广泛地应用于军用和民用领域。由文献[2]可知, 当今世界上在测距部分一般使用到达角度测量(Angle of Arrival, AOA)、到达时间测量(Time of Arrival, TOA)、到达时间差测量(TDOA)等方法。AOA需要额外添加设备, 且对计算量要求较大; TOA要求各个接收装置开始接纳信号的时间完全同步, 技术实现上难度相对较大; TDOA算法与其他方法相比, 其原理较为简单, 对硬件设施要求较低, 是一种比较实用、简单的方法。但在实验过程中仍存在由于阵列阵型不同、声源来波方位角不同、声源波长不同、声源与麦克风阵列距离不同等因素造成的误差<sup>[3]</sup>, 在对定位结果产生误差的不同因素中, 麦克风阵列阵型是一个影响较大且易于分析的因素, 本文对二维TDOA定位方程进行研究, 并通过 Matlab 进行仿真, 寻优求解, 找出满足待测目标误差最小时对应的阵列阵型最优布局。

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2021-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41375012); 北京市自然科学基金资助项目(kz201411232037)

## 1 基本理论

### 1.1 定位原理

#### 1.1.1 到达时间差测量(TDOA)定位方法

基于时间延迟的定位方法是常用的传声器阵列声源定位方法。典型的阵列声源定位示意图如图 1 所示。传感器采集声源发出的声音信号，由于各个传感器与声源之间的距离不同，且声速为定值，所以传感器采集到的信号之间存在着不同程度的时间延迟<sup>[4]</sup>。TDOA 算法通过对所采集到的信号进行提取，获得阵列中的传感器采集到的信号之间的相对延迟，然后利用一定的定位算法，从而对声源进行定位<sup>[5]</sup>。

利用基于时间延迟的定位算法对声源进行定位大致可以分为 2 步：1) 估计各个传感器之间的声源信号到达时间延迟；2) 利用算法对声源进行定位。

#### 1.1.2 信号模型及时延估计

假设 2 个传感器接收到的信号  $x_1(n)$ 、 $x_2(n)$  分别为：

$$x_1(n) = \alpha_1 s(n - \tau_1) + n_1(n) \quad (1)$$

$$x_2(n) = \alpha_2 s(n - \tau_2) + n_2(n) \quad (2)$$

式中： $s(n)$  为声源信号； $n_1(n)$  和  $n_2(n)$  为互不相关的噪声；声源信号与噪声也互不相关； $\tau_1, \tau_2$  为声波到传感器的传播时间； $\alpha_1, \alpha_2$  为声波的衰减系数。 $\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$  为两传感器的时延。

提取信号间时间延迟方法的种类很多，其中广义互相关算法在实际应用中使用最广泛。声源到 2 个传感器的信号  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  的互相关函数  $R_{12}(\tau)$  可表示为：

$$R_{12}(\tau) = E[x_1(n)x_2(n - \tau)] \quad (3)$$

将式(1)、式(2)带入式(3)，得：

$$R_{12}(\tau) = \alpha_1 \alpha_2 E[s(n - \tau)s(n - \tau_2 - \tau)] + \alpha_1 E[s(n - \tau_1)n_2(n - \tau)] + \alpha_2 E[s(n - \tau_2 - \tau)n_1(n)] + E[n_1(n)n_2(n - \tau)] \quad (4)$$

由于  $s(n)$ 、 $n_1(n)$ 、 $n_2(n)$  互不相关，式(4)可化为：

$$R_{12}(\tau) = E[\alpha_1 \alpha_2 s(n - \tau_1)s(n - \tau_2 - \tau)] = \alpha_1 \alpha_2 R_s[\tau - (\tau_1 - \tau_2)] \quad (5)$$

由互相关函数性质可以得到，当  $\tau_{12} = \tau_1 - \tau_2$  时， $R_{12}(\tau)$  可取得最大值。因此，求  $R_{12}(\tau)$  的最大值对应的  $\tau$  就是 2 个传感器之间的时延  $\tau_{12}$ 。

由互相关函数与互功率谱的关系可得：

$$R_{12}(\tau) = \int_0^\pi G_{12}(\omega) e^{-j\omega\tau} d\omega \quad (6)$$

式中  $G_{12}(\omega)$  为传声器信号  $x_1(n)$  和  $x_2(n)$  间的互功率谱。因此，在加入噪声的环境下，广义互相关算法具有更强的抗噪声性能，相关峰尖锐，时延效果最好。

#### 1.1.3 TDOA 定位解算

当声源处于  $(x, y)$  处时，声波到达坐标为  $(x_i, y_i)$  的  $i$  号传感器与坐标为  $(x_j, y_j)$  的  $j$  号传感器的时间延迟  $\Delta\tau_{ij}$  为：

$$\Delta\tau_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{v} \quad (7)$$

式中  $v$  为声速。

若传感器阵列中有  $N$  个传感器，则对位于  $(x, y)$  处的声源，存在着  $C_N^2$  个时间延迟因子，式(8)为  $(x, y)$  对应于所有传感器对的时间延迟数组  $\Delta\tau(x, y)$ 。

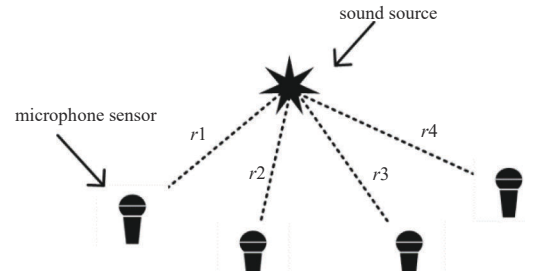


Fig.1 Schematic diagram of sensor array and sound source location

图 1 传感器阵列与声源位置示意图

$$[\Delta\tau(x,y)]_{\text{theory}} = [\Delta\tau_{1,2}(x,y), \Delta\tau_{1,3}(x,y), \dots, \Delta\tau_{n-1,n}(x,y)] \quad (8)$$

### 1) 最小二乘法

基于最小二乘法的定位方法是通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳匹配, 将传感器采集的信号进行两两互相关, 并获得对应于真实声源的时间延迟数组  $[\Delta\tau']_{\text{real}} = [\Delta\tau'_{1,2}, \Delta\tau'_{1,3}, \dots, \Delta\tau'_{(n-1),n}]$ 。

按式(9)最小二乘法算法获得  $(x,y)$  处所对应  $[\Delta\tau(x,y)]_{\text{theory}}$  与  $[\Delta\tau']_{\text{real}}$  之间的最小化误差的平方和  $\varphi(x,y)$ 。通过遍历检测区域内所有的坐标, 获得整个检测区域内  $\varphi(x,y)$  的分布情况, 当  $\varphi(x,y)$  取得最小值时, 其所对应的坐标即为声源位置。

$$\varphi(x,y) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N [\Delta\tau_{ij}(x,y) - \Delta\tau'_{ij}]^2 \quad (9)$$

### 2) 几何定位法

基于双曲线几何方式的定位方法是通过获得声源到达传感器的时间延迟, 获得声源到达不同传感器的空间距离差, 利用空间位置关系, 获得声源的位置。利用这种定位方式, 理论上只需 3 个传感器即可对声源进行定位。图 2 为三点定位的示意图。

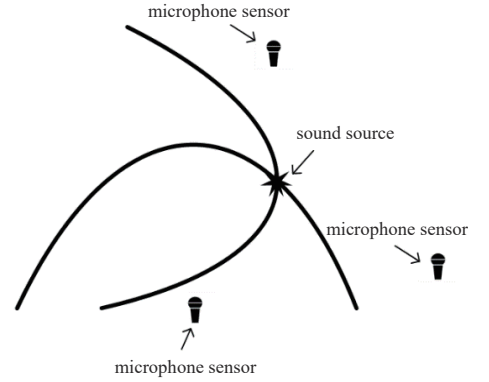


Fig.2 Diagram of three points positioning  
图2 三点定位示意图

## 2 误差来源分析

### 2.1.1 模型建立

由文献[6-7]可知, 假设声源目标位于远场环境, 声波以球面波方式进行传播。目标声源的定位性能主要与声速  $v$ 、阵列几何尺寸  $d$ 、时延估计误差  $\tau$  有关。如图 3 所示建立坐标系, 假设声源位置为  $P(x,y,z)$ ,  $S_1(d,0,0)$ 、 $S_2(0,d,0)$ 、 $S_3(-d,-d,0)$ 、 $S_4(0,0,d)$  为 4 个麦克风。声源坐标距离坐标轴原点为  $r$ , 设声源到 4 个麦克风距离分别为  $r_1, r_2, r_3, r_4$ 。俯仰角为  $\theta$ , 方位角为  $\varphi$ ,  $\tau_i$  为声源到达麦克风的时间差,  $v$  为空间中声速。根据空间坐标系几何关系可得:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \\ (x-d)^2 + y^2 + z^2 = (r + v\tau_1)^2 \\ x^2 + (y-d)^2 + z^2 = (r + v\tau_2)^2 \\ (x+d)^2 + (y+d)^2 + z^2 = (r + v\tau_3)^2 \\ x^2 + y^2 + (z-d)^2 = (r + v\tau_4)^2 \end{cases} \quad (10)$$

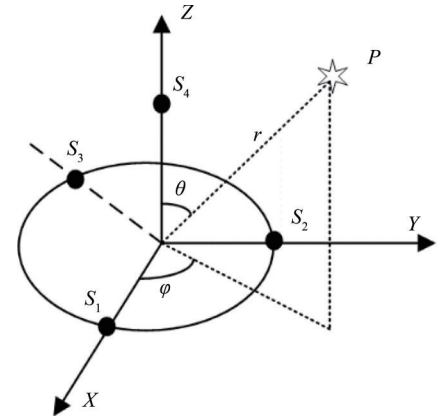


Fig.3 Establishment of four-array sound sources location model  
图3 四阵列声源定位模型建立图

由极坐标系与笛卡尔坐标系间关系化简可得球面坐标为:

$$\begin{cases} r = \frac{5d^2 - v^2 \sum_{i=1}^4 \tau_i^2}{2v \sum_{i=1}^4 \tau_i} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\tau_4 - \tau_3}{\tau_2 - \tau_1}\right) \\ \theta = \arctan\left(\frac{2\sqrt{2} \sqrt{(\tau_2 - \tau_1)^2 + (\tau_4 - \tau_3)^2}}{(\tau_4 - \tau_1)}\right) \end{cases} \quad (11)$$

由此可知, 通过该模型可以测量  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ , 并结合声速  $v$  确定目标  $P$  的空间位置, 完成对声音目标的定位。

由文献[8-10], 设阵列中麦克风的时间误差的标准差均为  $\sigma_\tau$ , 且互相独立。方向角、俯仰角和距离测量标准差与时间标准差之间的关系见式(12), 再对其他测量标准差进行求解。

$$\begin{cases} \sigma_{\varphi} = \sigma_{\tau} \sum_{i=1}^4 \frac{\delta\phi}{\delta\tau_i} \\ \sigma_{\theta} = \sigma_{\tau} \sum_{i=1}^4 \frac{\delta\theta}{\delta\tau_i} \\ \sigma_r = \sigma_{\tau} \sum_{i=1}^4 \frac{\delta r}{\delta\tau_i} \end{cases} \quad (12)$$

### 2.1.2 方向角标准差

仍以四阵元阵列为例，式(11)方向角对各时差求偏导数，可得：

$$\begin{cases} \frac{\delta\varphi}{\delta\tau_1} = -\frac{\delta\varphi}{\delta\tau_2} = \frac{1}{1 + \tan^2\varphi} \times \frac{\tau_3 - \tau_4}{(\tau_2 - \tau_1)^2} \\ \frac{\delta\varphi}{\delta\tau_3} = -\frac{\delta\varphi}{\delta\tau_4} = \frac{1}{1 + \tan^2\varphi} \times \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)，化简可得：

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sqrt{2} v}{d \sin\theta} \sigma_{\tau} \quad (14)$$

由式(14)可得方向角估计标准差的表达式，即方向角估计标准差与声速大小成正比，与阵列尺寸、俯仰角大小成反比。

### 2.1.3 俯仰角标准差

式(11)俯仰角对各时差求偏导数，可得：

$$\begin{cases} \frac{\delta\theta}{\delta\tau_1} = -\frac{\delta\theta}{\delta\tau_2} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{(1 + \tan^2\theta)(\tau_4 - \tau_1) \sqrt{(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_3 - \tau_4)^2}} \\ \frac{\delta\theta}{\delta\tau_3} = -\frac{\delta\theta}{\delta\tau_4} = \frac{\sqrt{(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_3 - \tau_4)^2}}{(1 + \tan^2\theta)(\tau_4 - \tau_1)} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)，化简可得：

$$\sigma_{\theta} = \frac{v \cos\theta}{2d \cos\varphi} \sigma_{\tau} \quad (16)$$

由式(16)可得俯仰角估计标准差的表达式，即俯仰角估计标准差与声速大小、俯仰角大小成正比，与阵列尺寸、方向角大小成反比。

## 3 实验仿真及结果分析

### 3.1 实验仿真

在对测量值标准差进行分析之后，为了验证 TDOA 定位算法在实验中的误差结果和分析不同阵列阵型搭建对实验结果所产生的影响，本文搭建了仿真模型对定位效果进行仿真和实测。探究麦克风阵列形状不同对结果造成的影响，由于上述理论分析中 4 阵元阵列无法形成多种阵列阵型，实验采用 16 个麦克风阵列作为仿真模型，控制每种阵列阵型的麦克风总数不变，分别应用十字型、同心圆形、L 型、Y 型、方型阵列进行声源定位，由于人耳可听到的声音频率范围在 20 Hz~20 kHz，但在实际生活中低于 30 Hz 的声音较为低沉压抑，而高于 16 kHz 的声音因为其频率过高，声音尖锐，会使人耳产生不适，根据国际电工协会 IEC581 标准和我国的 GB/T14277-93 国家标准划分的频段范围，30 Hz~150 Hz 为低频段，150 Hz~500 Hz 为中低频段，500 Hz~5 kHz 为中高频段，5 000 Hz~16 kHz 为高频段<sup>[1]</sup>。但在实际生活中，低于 150 Hz 的声音因其过于低沉压抑而较少被使用，高于 12 kHz 的声音因其过于尖锐刺耳也会使人耳感到不舒服，因此本试验选取 150 Hz~12 kHz 频率范围内的声音作为模拟声源，并在不同频段以不同的步长进行选点，在中低频段以 50 Hz 为步长，在中高频段以 500 Hz 为步长，在高频段以 1 kHz 为步长进行递增，研究上述声源频率范围内的定位结果及误差。

仿真实验中设置声源位置坐标为(100,100,100)，声源方向角为 45°，俯仰角 35.5°，麦克风采样频率为 20 kHz，由于半波长理论，麦克风阵列间距应大于所选取频率中最低频率所对应的半波长，因此麦克风间距应大于 340/

150≈2.3, 选取麦克风间距为 5, 将不同阵列采集到的麦克风信号代入 Matlab 程序中进行仿真, 使用 Matlab 中的 errorbar 函数计算误差并生成误差图像如图 4~图 8 所示。

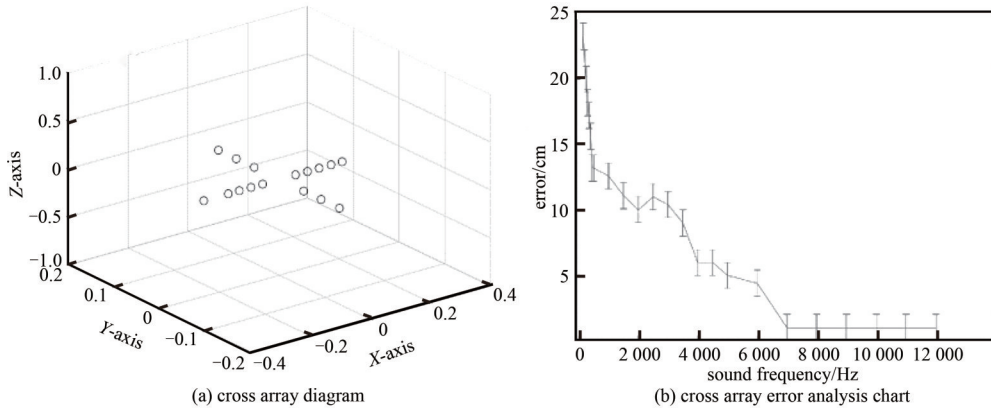


Fig.4 Cross array diagram and error analysis chart  
图 4 十字型阵列图、误差分析图

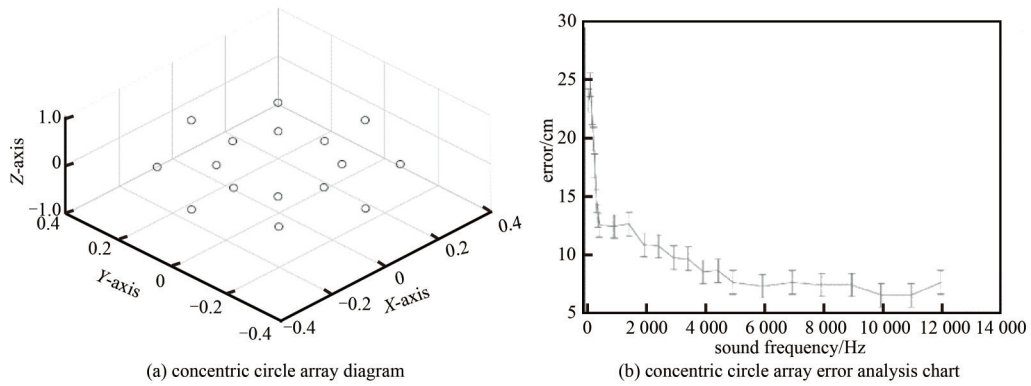


Fig.5 Concentric circle array diagram and error analysis chart  
图 5 同心圆阵列图、误差分析图

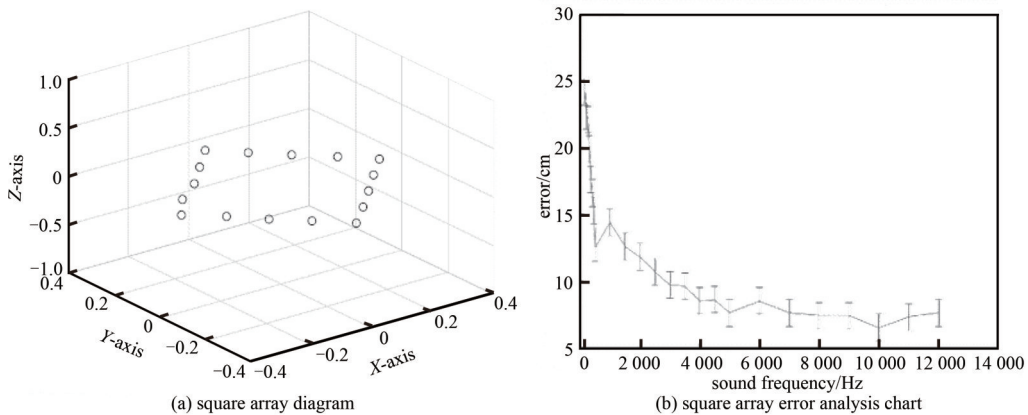


Fig.6 Square array diagram and error analysis chart  
图 6 方型阵列图、误差分析图

### 3.2 实验结果分析

实验以 30 Hz~12 kHz 频率的正弦波信号作为声源, 在不同频段分别进行不同步长进行选点, 运用 16 个麦克风分别组成十字型、同心圆、方型、Y 型、L 型阵列, 进行 TDOA 定位算法仿真分析, 其中时间延迟部分采用广义互相关法, 定位解算部分采用最小二乘法, 求得每种阵列下的声源定位结果<sup>[12]</sup>。

实验中可以得出, 在对比所有阵列定位结果时, 对于每种阵列来说, 定位误差整体上均随声源频率增高逐渐减小, 在 150 Hz~500 Hz 的中低频频段上, 声源误差较大, 误差结果分布在 11 cm~20 cm, 尤其在 300 Hz 以下时, 定位结果较为模糊, 误差较大, 其中原因可能是低频段声源衰减较快等。而在 500 Hz~5 000 Hz 的中高频段

及 5 000 Hz~12 kHz 的高频段上，误差结果逐渐趋于平缓且较小，接近于 5 cm~10 cm，尤其在中高频段的 3 000 Hz 条件下，定位误差显著降低，较中低频段误差降低了 50% 左右。

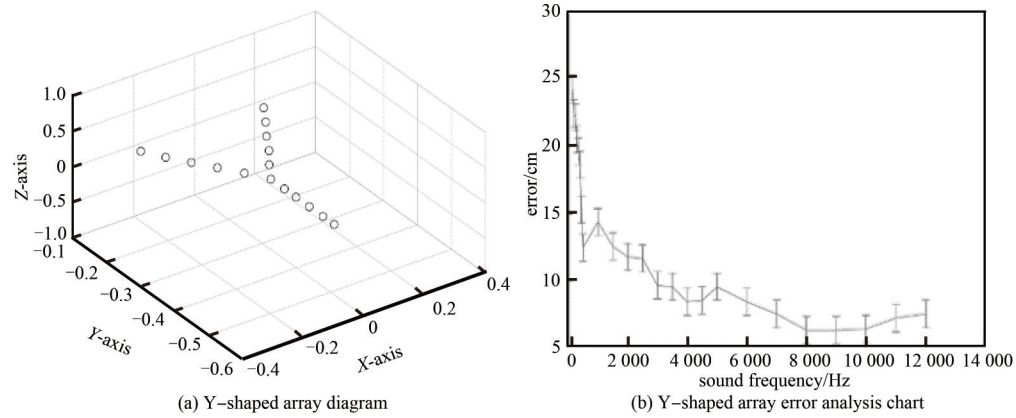


Fig.7 Y-shaped array diagram and error analysis chart  
图 7 Y 型阵列图、误差分析图

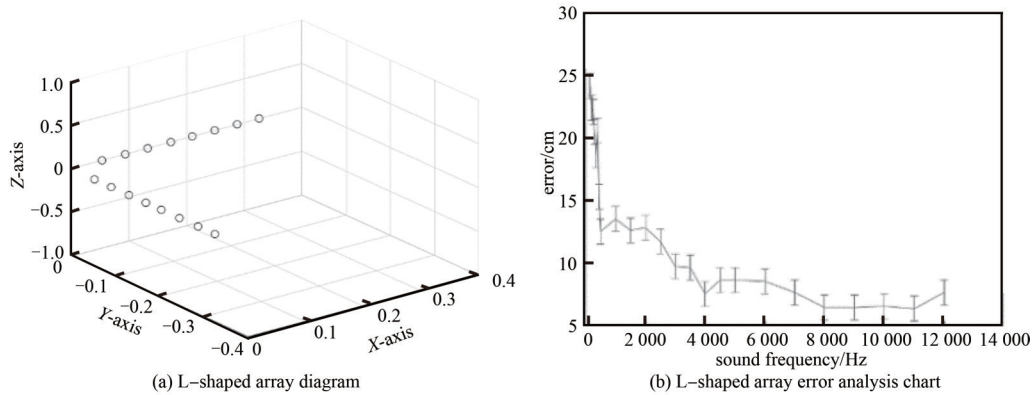


Fig.8 L-shaped array diagram and error analysis chart  
图 8 L 型阵列图、误差分析图

表 1 中低频段下每种阵列误差表

Table1 Error table of each array in medium and low frequency

array formation	error in medium and low frequency								error standard deviation
	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	350 Hz	400 Hz	450 Hz	500 Hz	
cross array	22.1	23.2	24.2	19.6	18.5	15.4	15.2	15.3	19.24
concentric circle array	23.2	24.5	22.1	19.9	17.6	15.3	14.6	13.3	18.87
square array	24.2	22.4	21	21.3	19.7	19.5	17.1	17.6	20.45
Y-shaped array	25.4	23.3	22.4	21.5	20.6	18.6	17.9	17.8	20.97
L-shaped array	26.6	25.6	23.5	23.5	22.6	19.7	18.6	17.8	22.21

表 2 中高频段下每种阵列误差表

Table2 Error table of each array in medium and high frequency

array formation	error in medium and high frequency										error standard deviation
	500 Hz	1 000 Hz	1 500 Hz	2 000 Hz	2 500 Hz	3 000 Hz	3 500 Hz	4 000 Hz	4 500 Hz	5 000 Hz	
cross array	15.3	12.1	13.4	12.4	11.3	12.3	10.6	10.7	10.3	11.4	10.59
concentric circle array	13.3	12.4	12.6	10.8	10.7	9.8	9.7	9.6	8.5	8.6	10.52
square array	17.6	14.5	14.6	13.2	13.5	11.6	11.8	11.5	11.7	10.7	12.96
Y-shaped array	17.8	16.5	15.6	14.4	14.6	13.5	12.6	12.7	11.6	10.8	13.91
L-shaped array	17.8	16.6	16.7	16.7	17.6	16.5	15.4	14.2	13.4	12.6	15.56

在对比各种不同阵列定位结果时，可以得出在所尝试的有限的 5 种阵列中，在中低频段下，同心圆阵列定位结果要优于其他 4 种阵列，误差较小，在中高频段和高频段下，同心圆阵列与十字阵列误差结果区别不大，由此可知，在全频段下，采用同心圆阵列可以得到较为准确的定位结果。从实验中还可以得出，在各种阵列下的定

位均存在不小于 7 cm 的误差, 这些误差可能来源于麦克风灵敏度、数据采集卡的采样率、声音传输介质等外界条件<sup>[13]</sup>, 此处不做探讨。

表 3 高频段下每种阵列误差表  
Table 3 Error table of each array in high frequency

array formation	error in high frequency								error standard deviation
	5 000 Hz	6 000 Hz	7 000 Hz	8 000 Hz	9 000 Hz	10 000 Hz	11 000 Hz	12 000 Hz	
cross array	11.4	10.8	9.8	9	8.8	9.8	9.8	8.9	7.75
concentric circle array	8.6	7.3	7.6	7.4	7.4	6.5	6.5	7.6	7.45
square array	10.7	9.6	8.4	8.5	7.4	7.6	7.8	8.9	8.12
Y-shaped array	10.8	8.8	7.9	7.8	8.7	6.7	5.6	7.6	8.45
L-shaped array	12.6	9.6	8.3	8.5	7.6	7.5	6.6	6.3	8.01

## 4 结论

声源定位这一技术可以采用不同的定位方法实验。在麦克风阵列声源定位技术中, 如何选用最合适、精确度最高的阵列阵型是亟待解决的问题, 笔者对此做了初步探索, 并通过计算机仿真及实验验证, 得到了有限范围内阵列中声源误差最小阵列阵型为同心圆, 对于实际应用有一定的参考价值。本文针对阵列的布放阵型并基于此在二维平面上对多个代表性的阵列结构进行了对比仿真。分析了二维方向上的灵敏度问题, 对空间定位中的阵列布放问题进行了研究设计, 并对通用阵型的布放准则提出一些建议。但在实际情况下进行的实验中, 影响 TDOA 定位精确度的因素还包括麦克风灵敏度、数据采集卡的采样率、声音传输介质等带来的观测误差, 笔者将在下一步的实验中继续分析上述因素带来的定位结果影响, 争取取得更为精准的研究结论。

### 参考文献:

- [1] 尚楚翔, 滕鹏晓, 吕君, 等. 大气次声源定位算法及误差分析[J]. 声学技术, 2020, 39(3): 360–365. (SHANG Chuxiang, TENG Pengxiao, LYU Jun, et al. Atmospheric infrasound source localization algorithm and error analysis[J]. Acoustics Technology, 2020, 39(3): 360–365.)
- [2] 孙建红, 张涛, 焦琛. 麦克风数量与阵型对声源定位性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11): 14–21. (SUN Jianhong, ZHANG Tao, JIAO Chen. Influence of microphone number and array on sound source localization performance[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11): 14–21.)
- [3] 齐小刚, 袁列萍, 刘立芳. 误差修正的声源目标混合定位算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(1): 1–7. (QI Xiaogang, YUAN Lieping, LIU Lifang. Error corrected hybrid localization algorithm for sound source and target[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019, 46(1): 1–7.)
- [4] 黄毅伟, 陈志飞, 佟建飞, 等. 地面声源 TDOA 定位环境扰动误差分析与补偿[C]// 2017 年全国声学学术会议论文集. 哈尔滨: 中国声学学会, 2017: 597–598. (HUANG Yiwei, CHEN Zhifei, TONG Jianfei, et al. Analysis and compensation of environmental disturbance caused by TDOA positioning of ground sound source[C]// 2017 National Acoustic Academic Conference of Chinese Acoustic Society. Harbin, China: Acoustical Society of China, 2017: 597–598.)
- [5] 张云鸽. 基于无线传感器网络的声源目标定位系统的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016. (ZHANG Yunge. Research and design of sound source target positioning system based on wireless sensor network[D]. Xi'an, China: University of Electronic Science and Technology, 2016.)
- [6] 周成胜, 王新喆, 孙胜红, 等. 传声器直线阵列在声源定位问题中的误差分析[J]. 电声技术, 2016, 40(4): 26–28. (ZHOU Chengsheng, WANG Xinzhe, SUN Shenghong, et al. Error analysis of microphone linear array in sound source location problem[J]. Electroacoustic Technology, 2016, 40(4): 26–28.)
- [7] 范卓立, 黄根春. 基于传声器阵列的声源定位算法与误差分析[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(10): 108–110, 114. (FAN Zhuoli, HUANG Genchun. Acoustic source localization algorithm and error analysis based on microphone array[J]. Sensors and Microsystems, 2014, 33(10): 108–110, 114.)
- [8] 徐勤奇, 杨鹏. 基于正四面体阵列的声源定位算法及误差分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(7): 296–299. (XU Qinqi, YANG Peng. Sound source localization algorithm and error analysis based on regular tetrahedral array[J]. Computer Simulation, 2013, 30(7): 296–299.)
- [9] 李帅. 宽带恒定束宽波束形成的主瓣干扰抑制算法[J]. 航空兵器, 2016(6): 21–24. (LI Shuai. Main lobe interference suppression algorithm for broadband constant beamwidth beamforming[J]. Aeronautical Weapons, 2016(6): 21–24.)
- [10] 王卓群, 王驹, 李亚军, 等. 基于 GDOP 的四星时差定位精确度分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020, 18(5): 808–812,

819. (WANG Zhuoqun, WANG Ju, LI Yajun, et al. Accuracy analysis of four-satellite TDOA positioning based on GDOP[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):808-812,819.)
- [11] KRALJEVI L, RUSSO M, STELLA M, et al. Free-field TDOA-AOA sound source localization using three soundfield microphones [J]. IEEE Access, 2020(8):87749-87761.
- [12] ASHIQUR Rahaman, BYUNGKI Kim. Sound source localization by ormia ochracea inspired low-noise piezoelectric MEMS directional microphone[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-10.
- [13] MAHMOOD R Azimi-Sadjadi, KUMAR Srinivasan Saravana, SAEID Ahmadinia. Acoustic localization of vehicular sources using distributed sensors[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2019,146(6):4913-4925.

#### 作者简介：

杨思琪(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为麦克风阵列声源定位 .email:657664503@qq.com.

王彩霞(1972-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为瞬态电磁信号获取及仪器研制.

田杨萌(1963-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电声技术与信号处理.

叶倩(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向为麦克风阵列声源定位.

刘畅(1996-), 男, 硕士, 主要研究方向为声源信号超宽带定位.

(上接第 49 页)

- [7] 洪雪丽. 基于电离层传播路径建模的短波未知辐射源传感器网络 TDOA 定位的求解方法[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017. (HONG Xueli. Solving the unknown shortwave emitter localization problem by ionospheric propagation modeling using sensor network TDOA measurements[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2017.)
- [8] 李文菊. 短波电离层分层多信号测向定位研究[D]. 成都:电子科技大学, 2019. (LI Wenju. Research on stratified multi-signal direction finding based on shortwave ionosphere[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.)
- [9] 吴玲玲, 谢华军, 张润生. 一种采用多分辨率设计的短波信号分析方法[J]. 无线电通信技术, 2017,43(2):29-32. (WU Lingling, XIE Huajun, ZHANG Runsheng. A method of multi-resolution analysis for HF signals[J]. Radio Communications Technology, 2017,43(2):29-32.)
- [10] 王权, 江桦, 陈含欣. 基于形态滤波的短波信号检测算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):733-734. (WANG Quan, JIANG Hua, CHEN Hanxin. An HF signal detection algorithm based on morphological filtering[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):733-734.)
- [11] 罗文华, 杨彦, 齐健, 等. 基于 GMM 非线性变换的说话人识别算法的研究[J]. 电子器件, 2017,40(3):545-550. (LUO Wenhua, YANG Yan, QI Jian, et al. Text-independent speaker recognition using GMM non-linear transformation[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017,40(3):545-550.)
- [12] 张从鹏, 李弘, 周邦平. 基于互相关法的超声波高精度回波定位方法研究[J]. 机电工程, 2019,36(8):831-832. (ZHANG Congpeng, LI Hong, ZHOU Bangping. Precise ultrasonic distance measurement method based on cross-correlation algorithm[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2019,36(8):831-832.)

#### 作者简介：

刘长远(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为信号处理 .email:lcysdhr@126.com.