DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2017. 04. 015

# 基于四元麦克风阵列时延差值的 全方位角声源定位方法研究

# 王 政,刘 君,晏克俊,高鹤明

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,陕西西安 710048)

**摘要**:针对传统的基于广义互相关的时延估计算法对噪声较为敏感这一问题,本文引入调整参数 ρ减小干扰信号在互功率谱中所占比例,并限制互相关函数的峰值搜索区间,提高了在低信噪比环 境下的时延估计性能。同时考虑信号间的提前、滞后关系,选取不同麦克风作为参考基准,并改进 方位角计算方法,从而实现全方位角声源定位。为验证算法的有效性,基于 LabVIEW 软件平台搭 建了一套声源定位系统,测试结果表明改进后的算法具有更好的抗噪声性能,方位角估计偏差值控 制在 5°以内,取得了较好的定位效果。

**关键词:** 麦克风阵列; 声源定位; GCC-PHAT-ργ; 全方位角 **中图分类号:** TN912.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)04-0464-05

# Study of full range of sound source localization using time-delay value based on four microphones array

WANG Zheng, LIU Jun, YAN Kejun, GAO Heming

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China) **Abstract:** As the traditional time-delay estimation algorithm based on generalized cross correlation is sensitive to the noise, the parameter  $\rho$  is introduced to reduce the proportion of the interference signal in the cross-power spectrum, with the peak search interval of the cross-correlation function limited to improve the performance of time-delay estimation in the low SNR. The different microphones are selected as the reference through considering the relationships of advance and delay in time between signals. The calculation method of the azimuth angle is further improved to realize the location of sound sources in full azimuth. A sound source localization system based on the LabVIEW is built to verify the validity of the algorithm. The result show that the improved algorithm has a better anti-noise performance and that the estimated deviation of azimuth angle is controlled within 5 degrees, and overall this test of sound source localization achieves a better effect.

Key words: microphone array; sound source localization; GCC-PHAT- $\rho\gamma$ ; full azimuth

声源定位技术是通过传声器接收声场信号,利 用电子装置进行信号转化处理,以此实现声源探测 定位的一种技术<sup>[1]</sup>。麦克风作为最基本的信号接收 设备之一,在声源定位中运用广泛,大到军事工业, 小到民用生活,都与之息息相关<sup>[2-3]</sup>。

传统的基于时延估计的声源定位算法对噪声较 为敏感,在低信噪比环境下定位性能较差,为此人们 提出了不同的改进理论。Liu 等<sup>[4]</sup>首先引入可调参数进行粗略时延估计,然后采用 ST 方法对时延值进行校正,最终定位精度小于 15°,取得了不错的定位效果。张雷岳等<sup>[5]</sup>综合 PHAT 和 ML 两种频域加权算法并加以改进,得出多种环境下的最优 q 值,提高了定位精度,但该算法较为复杂,不太适合小型嵌入式系统。

**收稿日期**: 2016-12-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51406164)

作者简介: 王政,男,硕士生,研究方向为声源定位技术。E-mail:wangzheng3120106@126.com

通讯作者:刘君,女,教授,研究方向为测试技术。E-mail:163. liujun@163. com

本文介绍了一种有效抗噪声干扰的时延估计理 论,并通过限制互相关函数的峰值搜索区间,提高了 抗伪峰干扰能力,提升了搜索效率。同时考虑信号 间的提前、滞后关系,改进声源方位角的处理方法, 实现了全方位角定位。

# 1 时延估计算法研究

## 1.1 时延的物理含义

通常假定声源信号以球面波形式进行辐射传播。为了便于分析和研究,我们作简化处理,将声源 与传声器考虑在同一个平面内,从而将三维球面波 模型转化为二维的柱面波模型<sup>[6]</sup>,见图 1。



图 1 声音传播的柱面波模型 Fig. 1 Cylindrical wave model for sound propagation

由于声源信号到达两麦克风的距离不同,麦克 风接收信号将会产生一段时间差,这段时间差称之 为时延。而两麦克风所在波阵面的距离差称之为声 程差,声程差等于时延与介质中声音传播速度的 乘积。

## 1.2 GCC-PHAT-ργ方法

时延估计理论基本以广义互相关(Generalized Cross Correlation,GCC)为基础。设两个麦克风i,j接收的周期信号分别为 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ ,基于GCC的时延估计算法可表示为:

$$R_{x_i x_j}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(\omega) G_{x_i x_j}(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \qquad (1)$$

式中:  $R_{x_i x_j}(\tau)$ 为  $x_i(t)$ 和  $x_j(t)$ 的互相关函数;  $G_{x_i x_j}(\omega)$ 为 $x_i(t)$ 和  $x_j(t)$ 的互功率谱; $\psi(\omega)$ 为加权函数;e 的上标 j 表示虚数单位。加权函数不同,就可 以得到不同的时延估计算法。本文主要针对基于相 位变化(PHAT)的加权函数进行研究,PHAT 表达 式为:

$$\psi(\omega) = \frac{1}{\mid G_{x_i x_j}(\omega) \mid}$$
(2)

GCC-PHAT 等价于白化滤波,本身具有一定的抗噪声性能,但由于 PHAT 的加权函数  $\varphi(\omega)$ 是  $G_{x_{x_x}}(\omega)$ 的绝对值的倒数,导致在信号能量小的地

方会出现较大误差<sup>[7]</sup>。针对这一问题,可以考虑根 据实际环境的信噪比大小,引入调整参数 $\rho$ 来增加 有用信号在互功率谱中所占比例,使其逼近于理想 环境下的互功率谱,从而提高低信噪比环境下的时 延估计性能,同时考虑到当信号能量较小时,分母会 趋于 0,从而加大误差,所以在加权函数的分母中加 入一个相干因子  $\gamma_{ij}(\omega)$ ,GCC-PHAT- $\rho\gamma$  的加权函 数为:

$$\psi(\omega) = \frac{1}{\mid G_{x_i x_j}(\omega) \mid^{\rho} + \mid \gamma_{ij}^2(\omega) \mid}$$
(3)

$$\gamma_{ij}(\omega) = \frac{G_{x_i x_j}(\omega)}{\sqrt{G_{x_i x_i}(\omega)G_{x_i x_i}(\omega)}}$$
(4)

式中: $G_{x_i x_i}(\omega)$ 、 $G_{x_j x_j}(\omega)$ 分別为信号  $x_i(t)$ 和  $x_j(t)$ 的 自功率谱; $0 \le \rho \le 1$ 。

## 1.3 限制互相关函数峰值搜索区间

由声程差的几何关系可以分析出,时延值被约 束在一个固定范围。由图 2 可知,假设声源为点声 源,两个麦克风间距为 D,声源到两麦克风的距离分 别为  $r_1$ 、 $r_2$ ,由三角形三边关系可知  $|r_1 - r_2| < D$ ,因 此在时延估计时对互相关函数的搜索空间应该限定 在[0,D/c]。



图 2 声程差几何关系 Fig. 2 Geometrical relationship of acoustic-path difference

通过限制互相关函数的搜索区间,能一定程度 上提高抗伪峰干扰能力,并提高搜索效率,同时判别 出时延值的正负性。具体判别方法见图 3。



Fig. 3 Method for judging time delay value

其中:T指单帧总时长, $T = N/f_s$ ;N指单帧总采样 点数; $f_s$ 为采样频率。如果峰值在[0,D/c]区间,则 时延差为正,值为 $\Delta t$ ,表示信号 $x_i(t)$ 超前于 $x_j(t)$ ; 如果峰值在[T - D/c,T]区间,则时延差为负,值为  $-(T-\Delta t)$ ,表示信号  $x_i(t)$ 滞后  $x_j(t)$ 。

## 2 声源定位模型及算法优化

#### 2.1 四元平面十字阵列模型

确定时延差值只是声源定位的第一步,下一步 将根据时延值与麦克风阵列的几何关系定位声源。 选取不同的麦克风阵列几何结构,所对应的定位算 法也各有异。阵列结构分一维、二维和三维,一维结 构实现较为简单,但存在定位识别死角,三维结构虽 然定位精度高,但实现起来较为复杂。文献[8]将一 维直线四元阵列和二维三角四元阵列相结合,对定 位算法进行了改进,取得了较好的性能。本课题基 于此模型进行拓展延伸,采用四个麦克风组成平面 十字阵列,利用几何关系推导求出声源与麦克风阵 列中心的距离r、方位角 $\varphi$ 、俯仰角 $\theta$ 的计算公式。

见图 4,四个麦克风分别置于 $M_1(d,0,0)$ ,  $M_2(0,d,0)$ , $M_3(-d,0,0)$ , $M_4(0,-d,0)$ ,其中d为麦克风之间的距离。声源位置S(x,y,z), $r_i$ 表示 声源到麦克风 $M_i$ 的距离, $\tau_{ij}$ 表示声源到麦克风 $M_i$ 与 $M_j$ 间的时延,r表示声源到坐标原点的距离,c为声音传播速度。



图 4 四元平面十字阵列 Fig. 4 Four microphones planar cross array

根据几何关系和声程差定义可联列方程组:

$$\begin{cases} x^{2} + y^{2} + z^{2} = r^{2} \\ (x - d)^{2} + y^{2} + z^{2} = r_{1}^{2} \\ x^{2} + (y - d)^{2} + z^{2} = r_{2}^{2} \\ (x + d)^{2} + y^{2} + z^{2} = r_{3}^{2} \\ x^{2} + (y + d)^{2} + z^{2} = r_{4}^{2} \\ r_{2} - r_{1} = \tau_{21}c \\ r_{3} - r_{1} = \tau_{31}c \\ r_{4} - r_{1} = \tau_{41}c \end{cases}$$
(5)

其中:

$$\begin{cases} x = r \cos\theta \cos\varphi \\ y = r \cos\theta \sin\varphi \\ z = r \sin\theta \end{cases}$$
(6)

将式(6)带入式(5),对其进行泰勒展开并忽略高次 项,可以推导出基于时延值的声源角度、距离计算 公式:

$$r \approx \frac{(\tau_{21}^2 + \tau_{41}^2 - \tau_{31}^2)}{2(\tau_{31} - \tau_{21} - \tau_{41})}$$
(7)

$$\varphi = \arctan \frac{\tau_{41} - \tau_{21}}{\tau_{31}} \tag{8}$$

$$\theta = \arcsin \frac{c \sqrt{\tau_{31}^2 + (\tau_{41} - \tau_{21})^2}}{d}$$
(9)

根据声源距离麦克风阵列中心的长度 r,方位 角 φ,俯仰角 θ,即可定位声源位置。

# 2.2 全方位角声源定位方法

如果以麦克风  $M_1$  作为参考基准,分别估出麦 克风  $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  跟  $M_1$ 之间的时间延迟  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{31}$ 、  $\tau_{41}$ ,根据式(8),基于  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{41}$ 计算的方位角  $\varphi$  被 限制在以  $M_1$  为轴线的左右 90°区间内,无法实现全 方位角定位。

我们可以改变不同的麦克风作为参考基准。以 改变麦克风  $M_2$  作为参考基准为例,对  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{41}$ 进 行公式转换,分别计算出麦克风  $M_1$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  跟  $M_2$ 之间的时间延迟  $\tau_{12}$ 、 $\tau_{32}$ 、 $\tau_{42}$ ,此时通过  $\tau_{12}$ 、 $\tau_{32}$ 、 $\tau_{42}$ 计 算所得方位角将被限制在以  $M_2$  为轴线的左右 90° 区间,由图 5 的区间象限关系可知,只要再通过角度 补偿 90°,即可拓展方位角的识别范围至 135°。



图 5 拓展方位角区间示意图 Fig. 5 Sketch map of expanding the range of azimuth

同时我们知道声源所处不同象限,四麦克风所 接收信号之间的时延有不同的超前、滞后关系,即  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{41}$ 有固定的正负组合。在声源定位计算前, 可以先根据  $\tau_{21}$ 、 $\tau_{31}$ 、 $\tau_{41}$ 的正负组合,初步判断声源 处于何象限,然后选择相对应的麦克风作为参考基 准,最后再补偿相应角度,即可实现全方位角( $\varphi \in [0^\circ, 360^\circ]$ )声源定位。表1展示了具体的方位角计 算优化方法。

例如,当<sub>721</sub>、<sub>731</sub>、<sub>741</sub>数值均为负值时,我们以麦

克风 M<sub>3</sub>为参考基准,根据式(5)我们可以推导求出:

$$\begin{cases} \tau_{13} = -\tau_{31} \\ \tau_{23} = \tau_{21} - \tau_{31} \\ \tau_{42} = \tau_{41} - \tau_{21} \end{cases}$$
(10)

基于 M<sub>3</sub> 为参考基准的方位角计算公式为:

$$\varphi = \arctan \frac{\tau_{43} - \tau_{23}}{\tau_{13}} \tag{11}$$

将上述式(10)带入式(11)计算出以麦克风  $M_{\circ}$  为参 考基准的方位角,再通过角度补偿 180°,即可转化 为以  $M_{1}$  为参考基准的方位角  $\varphi$  值。

表 1 方位角估计优化

序号	$\varphi$ 区间	$ au_{21}$	$ au_{31}$	$ au_{41}$	参考	角度
					基准	补偿
1	[0°,45°]	+	+	+	$M_1$	$+0^{\circ}$
2	[45°,90°]	_	+	+	$M_2$	$+90^{\circ}$
3	[90°,135°]	_	—	+	$M_2$	$+90^{\circ}$
4	[135°,180°]	_	_	_	$M_{\scriptscriptstyle 3}$	$+180^{\circ}$
5	[180°,225°]	_	_	_	$M_{\scriptscriptstyle 3}$	$+180^{\circ}$
6	[225°,270°]	+	—	—	$M_4$	$+270^{\circ}$
7	[270°,315°]	+	+	_	$M_4$	$+270^{\circ}$
8	[315°,360°]	+	+	+	$M_1$	$+360^{\circ}$

#### 3 基于 LabVIEW 的声源定位测试实验

#### 3.1 噪声对时延估计精度影响测试

为验证本文改进算法的抗噪声性能,将引入调整参数ρ并限制互相关函数峰值搜索区间的 GCC-PHAT-ργ 法与传统的 GCC-PHAT 法分别在不同 信噪比环境下进行对比测试。

测试在一个 6 m×3 m×4 m 的实验室进行,选 用两路麦克风采集音频,音频源时长 2 s,采样频率  $f_s$ 为 44.1 kHz,即总共产生 88 200 个采样点。设 置两个麦克风置于同一水平高度,分别测量声源至 两个麦克风的距离,求得声程差  $\Delta s$  约为 0.30 m。 假定声波的传播速度 c = 340 m/s,通过计算可知, 理论上两麦克风接收到的声音信号的时间延迟  $\tau = \Delta s/c = 8.824 \times 10^{-4}$  s,即理论时延移相采样点数  $N = \tau \times f_s = 39$ 。

人为添加高斯白噪声以改变测试环境信噪比大 小,使信噪比以 5 dB 为步长从一10 dB 变化到 30 dB,共进行 9 组测试,对比两种算法的估计值与理 论值的偏差,结果见表 2。从图 6 可以看出当信噪 比较高时,两种算法的误差率都比较低,均有比较好 的时延估计性能。随着噪声干扰变大,两种算法时 延估计性能都有不同程度的下降,但经改进后的算 法所得时延误差率相对较低,这说明引入调整参数 ρ对 GCC-PHAT 进行改进并限制互相关函数峰值 搜索区间后,抗噪声性能有所提高。

表 2 不同信噪比下两种算法的对比

Tab. 2 Comparison of two algorithms under different SN	ifferent SNRs
--	---------------

信噪比	理论时	GCC-PHAT		GCC-PHAT- $\rho\gamma$	
$/\mathrm{dB}$	延移相	估算值	误差/%	估算值	误差/%
-10	39	6	84.6	20	48.7
— 5	39	15	61.5	27	30.8
0	39	22	43.6	33	15.4
5	39	29	25.6	36	7.7
10	39	34	12.8	37	5.1
15	39	37	5.1	38	2.6
20	39	38	2.6	39	0
25	39	39	0	39	0
30	39	39	0	39	0



图 6 不同信噪比下两种算法的对比测试 Fig. 6 Test of two algorithms under different SNRs

#### 3.2 全方位角声源定位测试

为验证在全方位角范围内声源识别的准确度, 本文基于 LabVIEW 平台搭建了一套声源定位系统,并对声源方位角进行测试。

测试在实验室内进行,主要干扰噪声为电脑风 扇、偶尔人的说话声。测试系统由4个麦克风组成 的均匀十字阵列组成,各麦克风到阵列中心的距离 均为0.25 m,十字阵列放置在房间中心位置,距离 地面70 cm。设定时延估计算法的调整参数 ρ 为 0.75,采样率44 100 Hz。

固定测试俯仰角为 45°,方位角每隔 15°,分别 在距离阵列中心为 1 m、1.5 m、2 m 的 3 个位置进 行测试,每个声源位置测试 10 次,共采集到 720 组 数据。分别对每个声源位置测得的方位角求取平均 值,并与真实位置进行比较,计算误差。

分析实验数据可知,方位角估计最大偏差值为 8.2°,绝大部分方位角估计偏差值控制在 5°以内,取 得了较好的定位效果。 方位角的估计偏差大小与声源距离麦克风阵列 远近呈正相关趋势。由图 7 可以明显看出,声源距 离麦克风阵列越远,方位角的估算偏差值越大。主 要原因有两个:一是随着距离的增加,声音传播过程 中损耗也会增大;二是当声源距离阵列较远时,基于 声源近场模型的球面波前假设的误差会增加,从而 影响精度。



图 7 方位角估计偏差值曲线 Fig. 7 Deviation curves of azimuth angle estimate results

从图 7 中我们还可以看出,在接近 0°、90°、 180°、270°时,方位角的估计误差会有所增大。分析 原因可能来自于算法本身的缺陷。根据角度距离计 算公式(7),方位角接近 90°的整数倍时,正切值将 趋于无穷大,这将会增加算法的出错率。

# 4 结 论

本文基于广义互相关时延估计理论,介绍了一种 GCC-PHAT-py 法,并限制互相关函数峰值的搜 索区间,测试结果表明改进后的算法具有更好的抗 噪声性能;改进了声源方位角的计算方式,充分考虑 信号间的提前、滞后关系,拓展了声源方位角的识别 范围;搭建了一套四通道声源定位系统,对方位角进 行测试,结果显示方位角估计最大偏差值为 8.2°, 绝大部分方位角估计偏差值控制在 5°以内,取得了 较好的定位效果。

#### 参考文献:

[1] 叶诚,杨淑莹. 基于到达时间差的声源定位算法与实现 [J]. 天津理工大学学报,2015,31(2):50-54.

YE Cheng, YANG Shuying. Sound source localization algorithm and its implementation based on time differ-

ence of arrival [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2015, 31(2): 50-54.

- [2] SOUDEN M, BENESTY J, AFFES S. Broadband sound localization from an eigenanalysis perspective [J].
   IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2010, 18(6): 1575-1587.
- [3] 张亚虎. 基于 LabVIEW 的噪声源识别系统开发 [D].
  四川: 合肥工业大学, 2013.
  ZHANG Yahu. Development of noise source identification system based on LabVIEW [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2013.
- [4] LIU Hong, SHEN Miao. Continuous sound source localization based on microphone array for mobile robots
   [C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010: 4332-4339.
- [5] 张雷岳,张兴敢,刘超. 麦克风阵列声源定位中时延估 计的改进 [J]. 南京大学学报(自然科学),2015,51 (1):25-30.

ZHANG Leiyue, ZHANG Xinggan, LIU Chao. The improvement of time delay estimation in the microphone array sound localization system [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2015, 51(1): 25-30.

[6] 鲁佳. 基于传声器阵列的声源定位研究 [D]. 天津: 天 津大学, 2008.

LU Jia. The research on acoustic source localization based on microphone arrays [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.

- [7] 陈颖, 吴长奇. 基于麦克风阵列的声源定位算法研究及 DSP 实现 [J]. 燕山大学学报, 2013, 37(1): 63-67.
  CHEN Ying, WU Changqi. Research on sound source localization algorithm by microphone array and its realization based on DSP [J]. Journal of Yanshan University, 2013, 37(1): 63-67.
- [8] 季方彬. 基于 DSP 的声源定位装置的研究与实现 [D]. 辽宁: 东北大学, 2012.

JI Fangbin. Research and implementation of sound positioning device based on DSP [D]. Liaoning: Northeastern University, 2012.

(责任编辑 王绪迪)