

文章编号:1006-2467(2020)06-0562-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.085

仿生时延放大系统的设计及特性分析

张雅琼, 于丰宁, 塔娜, 饶柱石

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为了有效放大小孔径阵列接收信号间的时间差,提高其定位能力,设计了一个多输入多输出的时延放大系统.首先,对生物耦合结构的二自由度力学模型进行了高维扩展,并对耦合参数与时延放大的关系进行了深入研究;然后,基于高维耦合的力学模型,通过算法的形式实现了一个多输入多输出的时延放大系统,系统参数可根据声源频率进行灵活地调节,从而精确地控制时延放大倍数.实验结果表明:该系统可用于实现小孔径阵列接收信号间的时延放大,改善其定位精度.

关键词: 仿生耦合; 时延放大系统; 小孔径阵列; 声源定位

中图分类号: O 325; Q 811.6

文献标志码: A

Design and Characteristic Analysis of a Bio-Inspired Delay Magnification System

ZHANG Yaqiong, YU Fengning, TANa, RAO Zhushi

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to magnify time delays between received signals of small aperture arrays and improve the localization performance of such arrays, a multiple-input-multiple-output (MIMO) delay magnification system is presented. The mechanical model of the coupled ears is extended to be n -dimensional. Besides, the relationship between coupling parameters and magnification is investigated. Based on the mechanical model, a MIMO delay magnification system is proposed and realized by algorithm. System parameters can be adjusted flexibly according to sound frequency, and the magnification factor can be precisely controlled. Experimental results show that the delay magnification system can be applied to small aperture arrays to magnify the time delay of received signals and improve the sound source localization accuracy.

Key words: biomimetic coupling; delay magnification system; small aperture array; sound source localization

越来越多的应用领域对微型声定位装置提出了高精度的要求^[1-3]. 尽管微机械加工技术逐渐成熟,微型装置却很难实现高精度定位,这是由于其定位线索导致的. 信号到达不同传感器间的强度差和时间差,与传感器阵列的孔径成正比,普通的传感器阵

列可以通过扩大孔径的方式提高其定位性能;然而对于微型定位装置,由于受到空间尺寸的限制,阵列孔径难以扩大. 一个可能有效的方法是放大传感器阵列接收信号间的强度差和时间差,这种方法等效于扩大阵列孔径,而这一研究思路源自于一种小型

收稿日期:2019-03-28

作者简介:张雅琼(1989-),女,河北省邯郸市人,博士生,研究方向为仿生声定位.

通信作者:饶柱石,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-34206813;E-mail: zsrhao@sjtu.edu.cn.

寄生蝇——奥米亚棕蝇。

奥米亚棕蝇是一种具有超强定位能力的寄生蝇,虽然其耳间距仅为 0.5 mm 左右,却能凭借寄主发出的叫声准确地对其进行定位^[4]。研究表明,这种能力得益于其耳间一种特殊的耦合结构。该结构可有效放大两耳间接收信号的强度差和时间差,其效果等于将耳间距扩大了数十倍,从而获得了超强的定位能力^[5]。受奥米亚棕蝇耳间耦合结构的启发,许多学者进行了微机电系统(MEMS)的设计及开发。Miles 等^[6-7]开发了一款具有低背景噪声、高灵敏度的 MEMS 指向性传声器。Kuntzman 等^[8]与 Hall 等^[9]开发了 MEMS 指向性传声器,并利用多个压电传感端口实现了声压及压力梯度的同步测量。Liu 等^[10]模拟生物耦合结构,进行了微型声定位装置的开发,并在实验室条件下对装置的定位效果进行了验证。Wilmott 等^[11-12]采用两个互成一定角度的 MEMS 传声器实现了空间声源定位。Masoumi 等^[13]通过力-电类比进行了耦合电路的设计,并将其应用于天线阵列,构成了具有信号差异放大功能的耦合天线阵列。Xu 等^[3, 14]将耦合电路应用于传声器阵列,并利用耦合传声器阵列输出信号间的幅值差异实现了声源定位。王庆生等^[15]和 Yang 等^[16]将耦合模型扩展到了三维及更高维,并通过机械结构^[15]及模拟电路^[17]的形式实现了多个输入信号间的强度差及时间差的放大。

本文通过求解高维耦合模型的输出响应,深入研究了耦合模型时延放大特性与参数之间的关系,为高维耦合模型的设计提供了一套参数选择原则。考虑到机械结构及模拟电路的参数难以根据测试环境进行调节、测试声源受到限制等情况,基于高维耦合模型,通过算法实现了一个多输入多输出的线性时延放大系统。系统参数可根据声源频率灵活调节,实现对时延放大倍数的精准控制。实验结果表明,该系统可用于实现小孔径阵列接收信号间时延的放大,能够有效地提高其定位精度。

1 力学模型

奥米亚棕蝇耦合耳朵力学模型能够实现两个输入信号间的时延放大,为了将这一时延放大机制应用于多个输入信号,建立了一个 n 维耦合模型,其结构示意图如图 1 所示。其中, m 为质量; k 与 k_c (下标 c 表示耦合) 为刚度; c 与 c_c 为阻尼; f_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示施加在第 i 个质量单元上的力激励; x_i 为该质量单元的位移响应。该耦合模型由 n 个相同的质量-弹簧-阻尼系统组成,每两个系统之间通过扭簧

与阻尼连接,即第 i 个系统分别与其余 $n - 1$ 个系统耦合。该耦合模型是一个自由度为 n 的振动系统,当 $n = 2$ 时,该耦合模型退化为自由度为 2 的振动系统,即文献^[5]中的奥米亚棕蝇耦合耳朵力学模型。

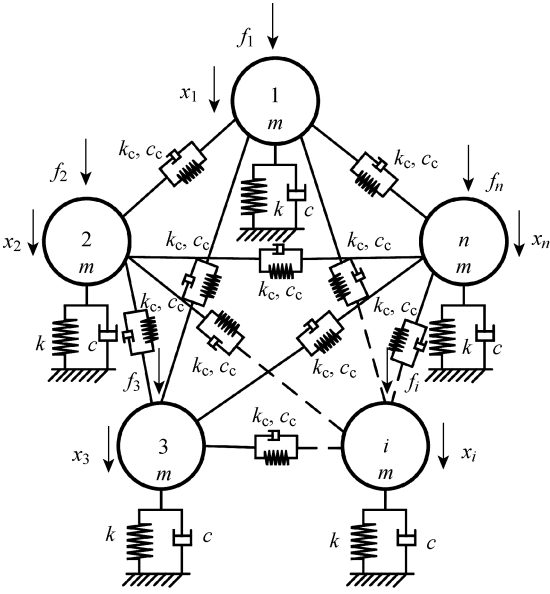


图 1 n 维耦合模型

Fig. 1 n -dimensional coupled model

图 1 所示的 n 维耦合模型的动力学方程可以表示为

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} + K\mathbf{X} = \mathbf{F} \tag{1}$$

式中:

$$M = \begin{pmatrix} m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m \end{pmatrix}_{n \times n} \tag{2}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{ii} & c_c & \cdots & c_c \\ c_c & c_{ii} & \cdots & c_c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_c & c_c & \cdots & c_{ii} \end{pmatrix}_{n \times n} \tag{3}$$

$$c_{ii} = c + (n - 1)c_c$$

$$K = \begin{pmatrix} k_{ii} & k_c & \cdots & k_c \\ k_c & k_{ii} & \cdots & k_c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_c & k_c & \cdots & k_{ii} \end{pmatrix}_{n \times n} \tag{4}$$

$$k_{ii} = k + (n - 1)k_c$$

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T \tag{5}$$

$$\mathbf{F} = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_n]^T \tag{6}$$

系统的响应是由稳态响应以及瞬态响应组成的。由于阻尼的存在,随着时间的延续,瞬态响应将逐渐减小直至消失,系统最终只剩下稳态响应。因此,这里

只讨论系统的稳态解,通过模态分析法^[18]获得系统响应

$$x_i = \frac{\sum_{q \neq i} (f_i - f_q)}{nm(-\omega^2 + j2\xi_1\omega_1\omega + \omega_1^2)} + \frac{\sum_{q=1}^n f_q}{nm(-\omega^2 + j2\xi_2\omega_2\omega + \omega_2^2)} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \sqrt{[k + (n-2)k_c]/m} \\ \omega_2 &= \sqrt{[k + (2n-2)k_c]/m} \\ \xi_1 &= [c + (n-2)c_c]/(2\omega_1 m) \\ \xi_2 &= [c + (2n-2)c_c]/(2\omega_2 m)\end{aligned}$$

ω 为声源频率. 该系统有 n 阶无阻尼固有频率, 前 $n-1$ 阶数值相等, 均为 ω_1 ; 第 n 阶为 ω_2 . 因此, 当系统在频率 ω_1 处振动时, 有 $n-1$ 阶振动模态, 这些振动模态的阻尼比为 ξ_1 ; 而当系统在频率 ω_2 处振动时, 有唯一的振动模态, 对应的模态阻尼比为 ξ_2 .

2 时延放大特性

对于声激励, 作用于质量单元上的力与该处的声压成正比. 考虑远场单频声源, 由于质量单元间的距离很小, 激励力将具有相同的幅值及微小的时延

$$\tau_{\text{out}_ip} = \frac{\tau_{\text{in}_ip} [(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) + 4\omega_1\xi_1\omega_2\xi_2\omega^2]}{(\omega_1^2 - \omega^2)^2 + 4\omega_1^2\xi_1^2\omega^2 + (\tau_i + \tau_p)[2\omega_2\xi_2(\omega_1^2 - \omega^2) - 2\omega_1\xi_1(\omega_2^2 - \omega^2)]\omega^2} \quad (13)$$

由式(13)可知, 输出时延只与相对应的激励力的时延有关, 而与其余激励力的时延无关. 在二维耦合模型中, 由于 $\tau_1 + \tau_2 = 0$, 输出时延只与输入时延有关, 而与各激励力的时延无关; 然而对于高维耦合模型, 只有当式(13)分母中的第 3 项等于 0 时, 即系统参数满足条件:

$$\frac{\omega_2^2 - \omega^2}{\omega_1^2 - \omega^2} = \frac{\omega_2\xi_2}{\omega_1\xi_1} \quad (14)$$

输出时延才只与输入时延有关, 而与各激励力的时延无关. 为了便于计算, 令上式等于 η , 并将其代入式(13), 则输出时延可以表示为

$$\tau_{\text{out}_ip} = \eta\tau_{\text{in}_ip} \quad (15)$$

式(15)意味着通过选择合适的耦合参数, 耦合模型可以看作一个多输入多输出的时延线性放大系统. 系统的时延放大倍数为 η , 不受声波入射角度的影响, 而只与声源频率及耦合参数有关. 将满足式(14)的频率定义为系统的设计频率, 并记为 ω_0 .

为了保证系统的线性放大特性, 需要合理设计耦合参数. 为了使 $\eta > 1$, 同时考虑多自由度振动系统的实际物理意义, 根据式(14)可得到

差异, 可以表示为

$$f_i = A_0 e^{j\omega(t-\tau_i)} \quad (8)$$

式中: A_0 为幅值; τ_i 为时延, 表示声波到达质量单元 i 与耦合模型几何中心的时间差. 因此, 各激励力的时延满足以下关系

$$\sum_{i=1}^n \tau_i = 0 \quad (9)$$

定义 f_i 与 f_p 间的时延为声波达到两个质量单元的时间差, 记为输入时延, 表示为

$$\tau_{\text{in}_ip} = \tau_i - \tau_p \quad (10)$$

两个质量单元位移响应间的时延, 记为输出时延, 可以表示为

$$\tau_{\text{out}_ip} = \frac{1}{\omega} \left[\arctan \frac{\text{Im}(x_p)}{\text{Re}(x_p)} - \arctan \frac{\text{Im}(x_i)}{\text{Re}(x_i)} \right] \quad (11)$$

式中: $\text{Im}(\cdot)$ 和 $\text{Re}(\cdot)$ 分别表示取虚部以及取实部运算.

假设质量单元间的距离远小于声波波长, 那么可以进行以下小角度假设

$$\left. \begin{aligned}\sin(\omega\tau_{\text{in}_ip}) &= \omega\tau_{\text{in}_ip} \\ \cos(\omega\tau_{\text{in}_ip}) &= 1 \\ \arctan(\omega\tau_{\text{out}_ip}) &= \omega\tau_{\text{out}_ip}\end{aligned} \right\} \quad (12)$$

根据式(12), 式(11)可以表示为

$$\omega_0 < \omega_1 < \omega_2 \quad (16)$$

将式(14)改写为如下形式

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{\frac{(1-\eta)(\xi_2/\xi_1)^2}{\eta[\eta - (\xi_2/\xi_1)^2]}} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)可以得到

$$\xi_2/\xi_1 < \eta < (\xi_2/\xi_1)^2 \quad (18)$$

根据式(18), 为了使 $\eta > 1$, 阻尼比需满足关系

$$\xi_2/\xi_1 > 1 \quad (19)$$

同时, 考虑振动系统的实际物理意义, 阻尼比需满足条件 $\xi_1, \xi_2 \in (0, 1)$. 由于振动系统的阻尼比决定了瞬态响应的衰减时间, 为了尽快进入稳态响应阶段, 两个阻尼比应尽可能选得比较大, 可将 ξ_1 的范围设置为 $0.1 < \xi_1 < 0.4$, 然后根据 η 并结合式(18)设计 ξ_2 . 继而根据 ω_0 、 η 、 ξ_1 和 ξ_2 , 利用式(14) 获得 ω_1 和 ω_2 . 最后利用式(7) 计算系统的耦合参数 (m 、 k 、 c 、 k_c 、 c_c). 需要指出的是, 5 个未知变量间只存在 4 个约束条件, 将有无穷多组满足条件的耦合参数, 为了方便计算, 我们令 $m = 1 \text{ kg}$, 其余 4 个变量可通过式(7)唯一确定.

上述研究建立在式(12)小角度假设成立的基础上,不失一般性,对影响式(12)成立的声源频率、输入时延及放大倍数进行讨论,研究这些因素对系统时延放大特性的影响.以 $n=3$ 为例,假设耦合模型各质量单元布置如图 2 所示,质量单元 1 与 2、3 的间距 $d=0.03\text{ m}$. τ_{in_12} 与 τ_{in_13} 和声源方位角 α 与俯仰角 θ 的关系可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{in}_12} &= d\sin\theta\cos\alpha/c_0 \\ \tau_{\text{in}_13} &= d\sin\theta\sin\alpha/c_0 \end{aligned} \right\}$$

(20)

式中: c_0 为声速.

首先,在相同放大倍数下,研究声源频率对系统输出时延的影响.假设 ω 分别为 100π 、 $1\,000\pi$ 以及

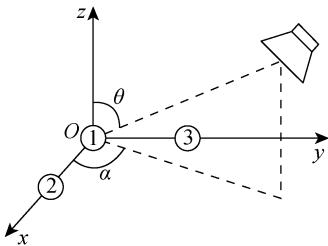


图 2 耦合模型与声源的几何位置关系
Fig. 2 Geometric relationship between sound source and coupled model

$2\,000\pi\text{ rad/s}$,选择 $\eta=5$,根据上述方法设置系统参数,如表 1 所示.当 $\theta=20^\circ$, $\alpha=0^\circ\sim90^\circ$ 时,由式(11)计算获得的输出时延如图 3 所示.其中,理论值(TV)曲线由式(15)获得.由图 3 可知, τ_{out_12} 与 τ_{out_13} 的计算结果呈现相同规律:当 $\omega=100\pi\text{ rad/s}$ 时,计算结果与理论值重合;而随着 ω 增大,计算结果逐渐偏离理论值曲线.这说明对于有放大倍数要求的时延放大系统,其测试频率不能无限增大.

在相同声源下,研究放大倍数及输入时延对系统放大特性的影响.定义输出时延的近似误差为

$$E_{ip} = \eta\tau_{\text{in}_{ip}} - \tau_{\text{out}_{ip}}$$

(21)

平均近似误差 \overline{E}_{ip} 为 E_{12} 与 E_{13} 绝对值的算术平均值.当 $\omega=1\,000\pi\text{ rad/s}$, $\alpha=20^\circ$, $\theta=5^\circ\sim90^\circ$ 时,不同放大倍数下的平均近似误差如图 4 所示.从图 4 中可以看到,随着 η 的增加,平均近似误差逐渐增大.当 η 较小($\eta=1.5$) 时,平均近似误差几乎为 0;而当 $\eta=5$ 与 $\eta=9$ 时,随着 θ 的增大,平均近似误差明显增大,这是由于输入时延增加导致的.这意味着较大的放大倍数需要以牺牲俯仰角的测试范围为代价.根据式(20), d 增大同样会导致输入时延的增加,因而 d 对平均近似误差的影响规律与 θ 相同,此处不再赘述.

表 1 系统参数
Tab. 1 Parameters of the system

组号	$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_0/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	η	$\omega_1/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_2/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	ξ_1	ξ_2
1	50π	50π	5	335.56π	723.20π	0.25	0.58
2	$1\,000\pi$	$1\,000\pi$	5	$3\,355.63\pi$	$7\,231.96\pi$	0.25	0.58
3	$2\,000\pi$	$2\,000\pi$	5	$6\,711.26\pi$	$14\,463.92\pi$	0.25	0.58
4	$1\,000\pi$	$1\,000\pi$	1.5	$2\,457.86\pi$	$2\,926.03\pi$	0.25	0.32
5	$1\,000\pi$	$1\,000\pi$	9	$1\,705.61\pi$	$4\,264.01\pi$	0.25	0.44

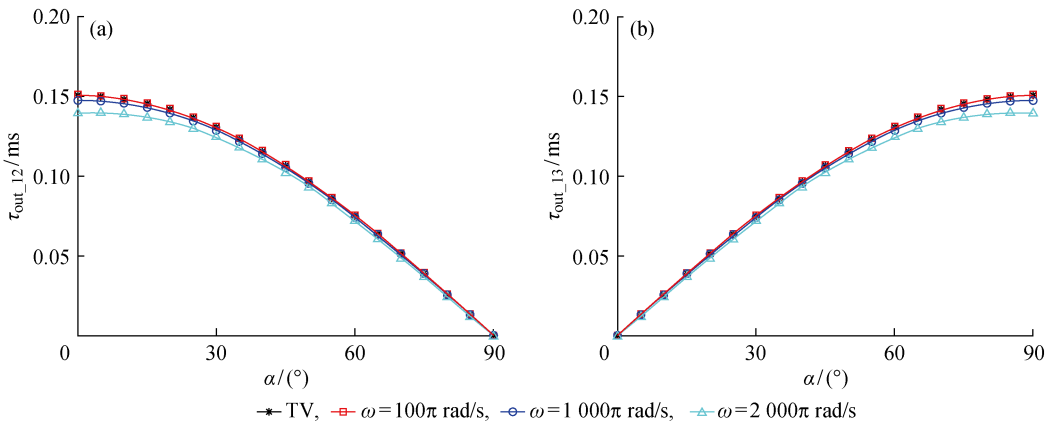


图 3 输出时延的计算结果与理论值比较
Fig. 3 Comparison of calculated results and theoretical values of output time delay

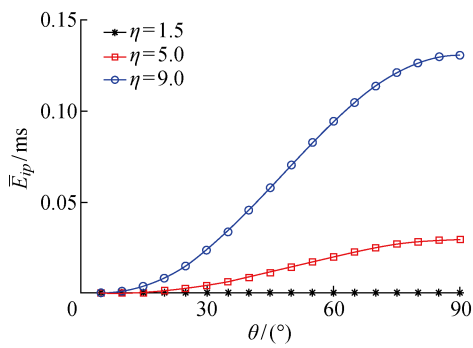


图 4 不同放大倍数下的平均近似误差对比
Fig. 4 Comparison of average approximate errors at different magnification factors

上述分析说明,声源频率、输入时延及放大倍数均会影响系统的时延放大特性,在实际应用中,应结合声源频率、测试条件及需求,合理选择放大倍数,保证近似误差在可接受的范围内。

3 时延放大系统的实现

上述时延放大系统有多种实现方式,如利用 MEMS 技术开发新型传感器,或通过力-电类比技术设计模拟电路.考虑到机械系统与电路系统的参数难以根据声源频率进行调节,通过一套算法来实现上述时延放大系统的功能.该算法是通过程序控制的方式实现的,系统的设计频率可以根据输入信号的频率灵活地调节,从而适应不同频率的声源.该算法需要与声信号接收装置配合使用,其输入信号为接收装置的输出信号.默认算法输入是单频信号或可近似为单频信号处理的窄带信号,对于宽频声源,默认信号已经过窄带滤波器处理.

算法流程如图 5 所示.首先,对输入信号进行快速 Fourier 变换分析获得信号的频谱信息,用于设置 ω_0 ;同时,根据测试条件及需求设定 η ;接着,根据

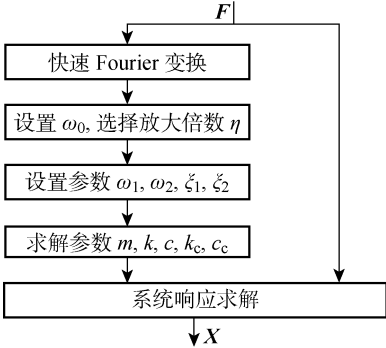


图 5 算法流程图
Fig. 5 Flowchart for the algorithm

ω_0 和 η ,参照系统参数选取方法,确定 ω_1 、 ω_2 、 ξ_1 及 ξ_2 ;然后,通过式(7)得到 k 、 k_c 、 c 、 c_c 及 m ($m = 1 \text{ kg}$);最后,将这组参数和输入信号一起输入到系统响应求解模块,根据式(1),借助数值计算方法,获得时延放大系统的输出.数值计算方法有很多,采用计算速度较快,同时求解精度较高的 Newmark- β 法.

4 实验结果与分析

以 $n=3$ 为例,对上述时延放大系统进行了实验验证.该实验是在消声室和控制室共同完成的,实验装置如图 6 所示.消声室测试系统如图 7 所示,由一个阵列架和一个置于远场的扬声器构成.扬声器由控制室内的信号发生器控制,产生一个频率为 500 Hz 的声音信号.阵列架上固定着 3 个传声器 (BSWA MPA416) M_1 、 M_2 与 M_3 ,用于接收该声信号,并将其转换为电信号输入到数据采集器中.传声器的布置见图 2,不同声源方位通过调整位于阵列架下方和后方的旋转台得到,两个旋转台均由一台控制器控制.数据采集器将采集到的信号输入电脑,通过上述算法获得时延放大系统的输出信号.信号采样频率为 102.4 kHz,采样点数为 32 768.

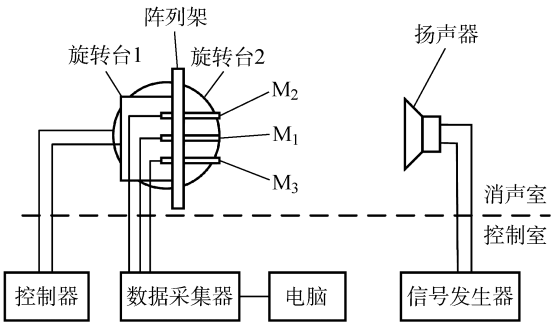


图 6 实验装置示意图
Fig. 6 Diagram of experimental setup



图 7 消声室测试系统
Fig. 7 Measurement system in anechoic chamber

当声源位于 $(\theta, \alpha) = (20^\circ, 135^\circ)$ 时,数据采集器的输出信号,即时延放大系统的输入信号如图 8(a) 所示.其中, A'_0 为归一化后的幅值.为了较清晰地展

示信号波形,设定时间显示长度为 7 ms. 根据输入信号的频谱分析,设置 $\omega_0 = 1\,000\pi$ rad/s,选择 $\eta = 5$,系统参数如表 1 所示. 时延放大系统的输出信号如图 8(b)所示,其中 t 为采样时间. 从图 8(a)中可以发现,由于传声器之间的距离十分微小,3 个输入信号几乎重合在了一起;而图 8(b)中输出信号间的时延清晰可见,这说明时延放大系统能够有效地放大信号间的时延. 观察图 8(b)可以发现,输出信号的初始部分并不稳定,这是由瞬态响应引起的,但由于阻尼的作用,输出信号迅速趋于稳定,且稳定后的信号具有与输入信号相同的频率.

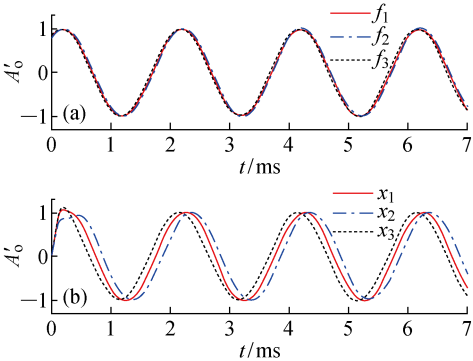


图 8 输入信号与输出信号的时域图对比

Fig. 8 Comparison of time domain of input signals and output signals

为了进一步验证系统的时延放大特性,探究时延放大对声源定位的影响,对声源位于不同方位的情况进行了研究. 保持 $\theta = 20^\circ$ 不变, $\alpha = 0^\circ \sim 45^\circ$, 间隔角度为 5° . 利用基本互相关方法对时延放大系统的输入时延及输出时延进行估计,估计结果如图 9 所示. 图 9 中,输入时延理论值 τ_{in_12} 与 τ_{in_13} 由式(20)计算得到,输出时延理论值 τ_{out_12} 与 τ_{out_13} 由式(15)计算得到. 从图 9(b)可以看出,对于所有的声源方位,输出时延都明显大于输入时延,且估计结果与理论值曲线吻合良好,验证了时延放大系统的有效性. 在图 9(a)中,随着 α 减小, τ_{out_12} 的估计结果逐渐偏离理论值曲线. 这主要是由两方面因素导致的:① 输出时延与理论值间存在一定的近似误差(见图 3(a)),该误差影响相对较小;② 测试系统存在一定的加工、安装及测试误差,使得声源方位与设置值间存在偏差,该误差称为系统误差. 在实际应用中,由于系统误差往往可以通过误差补偿的方式进行消除,这里不做讨论. 观察图 9(a)和(b)可以发现,对于不同的声源方位,时延估计结果可能相同,这意味着时延分辨率将限制声源的方位分辨能力. 此外,由于时延放大系统的作用,输出时延对声源方位变化

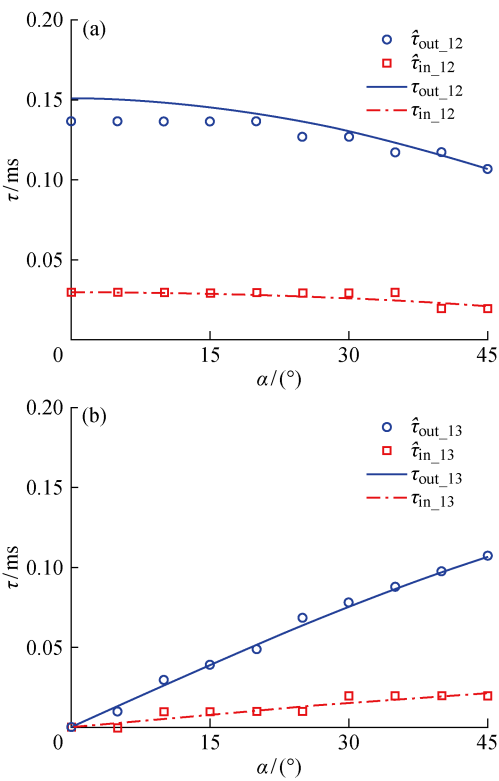


图 9 输入时延与输出时延的估计结果

Fig. 9 Estimation results of input and output time delays

的灵敏度提高,时延分辨率的影响被削弱,这意味着时延放大系统将有利于提高声源的定位精度.

为研究时延放大系统对声源定位的影响,根据得到的时延估计结果进行声源方位估计,估计结果记为 $(\hat{\theta}, \hat{\alpha})$. 对于有时延放大系统的情况,需要先将输出时延的估计值除以 η 得到输入时延的估计值,再通过式(20)进行方位估计. 定义声源定位误差为

$$E_{l_0} = \sqrt{(\hat{\theta} - \theta)^2 + (\hat{\alpha} - \alpha)^2} \quad (22)$$

有无放大系统的定位误差对比如图 10 所示. 从图 10 中可以看出,无放大系统时,误差波动较大;而

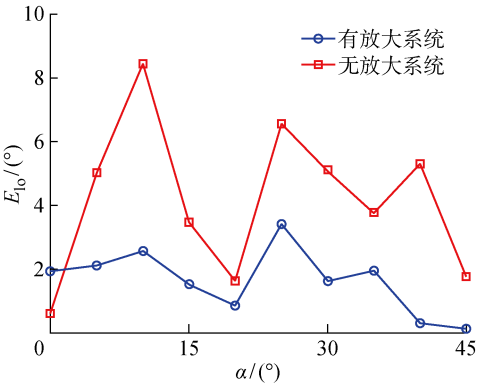


图 10 有无时延放大系统时的定位误差对比图

Fig. 10 Comparison of localization errors with and without delay magnification system

引入放大系统后,误差波动明显减小,但随着 α 减小,误差有增大的趋势,这主要是由系统误差引起的.除去系统误差较大的方位 $(\theta, \alpha) = (20^\circ, 0^\circ)$,经过时延放大系统处理,定位误差都得到了明显的降低,说明时延放大系统有效地提高了声源的定位精度.

5 结语

高维耦合模型可将输入信号间的时延进行线性放大,但是放大倍数受到耦合参数及声信号频率的影响.本文提出的耦合模型参数设计原则,可确保在不同声信号频率下均能取得理想的时延放大效果.通过算法实现了该耦合模型的时延放大功能,使得耦合参数可以根据声源频率进行灵活调节,从而精确地控制时延放大倍数,克服了机械系统与电路系统中参数不便于调节的缺点.对时延放大系统进行了实验验证,表明该系统能够按预期放大接收信号间的时延,并有效地提高小孔径阵列的定位精度.

参考文献:

- [1] ZHANG X, HUANG J C, SONG E L, *et al.* Design of small MEMS microphone array systems for direction finding of outdoors moving vehicles[J]. **Sensors**, 2014, 14(3): 4384-4398.
- [2] TIETE J, DOMÍNGUEZ F, SILVA B, *et al.* Sound-Compass: A distributed MEMS microphone array-based sensor for sound source localization[J]. **Sensors**, 2014, 14(2): 1918-1949.
- [3] XU X Y, BAO M, JIA H. A biomimetic coupled circuit based microphone array inspired by the fly *Ormia ochracea*[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2017, 141(5): 3649.
- [4] MASON A C, OSHINSKY M L, HOY R R. Hyperacute directional hearing in a microscale auditory system[J]. **Nature**, 2001, 410(6829): 686-690.
- [5] MILES R N, ROBERT D, HOY R R. Mechanically coupled ears for directional hearing in the parasitoid fly *Ormia ochracea*[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1995, 98(6): 3059-3070.
- [6] MILES R N, CUI W L, SU Q T, *et al.* A MEMS low-noise sound pressure gradient microphone with capacitive sensing[J]. **Journal of Microelectromechanical Systems**, 2015, 24(1): 241-248.
- [7] MILES R N. Acoustically coupled microphone arrays[J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 2016, 138(6): 064503.
- [8] KUNTZMAN M L, HEWA-KASAKARAGE N N, ROCHA A, *et al.* Micromachined in-plane pressure-gradient piezoelectric microphones[J]. **IEEE Sensors Journal**, 2015, 15(3): 1347-1357.
- [9] HALL N A, KUNTZMAN M, KIM D. A biologically inspired piezoelectric microphone[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2017, 141(5): 3794.
- [10] LIU H J, CURRANO L, GEE D, *et al.* Understanding and mimicking the dual optimality of the fly ear[J]. **Scientific Reports**, 2013, 3: 2489.
- [11] WILMOTT D, ALVES F, KARUNASIRI G. Bio-inspired miniature direction finding acoustic sensor[J]. **Scientific Reports**, 2016, 6: 29957.
- [12] WILMOTT D, ALVES F, KARUNASIRI G. High sensitive MEMS directional sound sensor with comb finger capacitor electronic readout[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2015, 138(3): 1768.
- [13] MASOUMI A R, GHAEMI K, BEHDAD N. A two-element biomimetic antenna array with enhanced angular resolution and optimized power extraction[J]. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, 2015, 63(3): 1059-1066.
- [14] XU H P, XU X Y, JIA H, *et al.* A biomimetic coupled circuit based microphone array for sound source localization[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2015, 138(3): 270-275.
- [15] 王庆生, 饶柱石, 塔娜. 微型仿生声定位结构的设计及定位方法的研究[J]. **振动与冲击**, 2010, 29(4): 122-129.
- WANG Qingsheng, RAO Zhushi, TA Na. Mechanism of a mini-instrument for sound source localization[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2010, 29(4): 122-129.
- [16] YANG M, ZHU X L, ZHANG Y Q, *et al.* Parameter study of time-delay magnification in a biologically inspired, mechanically coupled acoustic sensor array[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 2016, 140(5): 3854-3861.
- [17] ZHU X L, YANG M, ZHANG Y Q, *et al.* Study of response difference amplification and bionic coupled circuit in small acoustic array for spatial localization[J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 2018, 140(4): 041013.
- [18] RAO S S. Mechanical vibrations[M]. 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice hall, 2011: 603-606.

(本文编辑:石易文)