

文章编号 1004-924X(2017)09-2516-08

基于奥米亚棕蝇定位机理的仿生耦合处理系统

侯艳丽^{1,2,3*}, 夏克文^{1*}, 纪学军³

(1. 河北工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300401;

2. 河北科技大学 信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050018;

3. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 考虑超短基线的奥米亚棕蝇能精确地定位其寄主声源, 建立了基于奥米亚棕蝇的仿生耦合处理系统以提高小型化测向设备的性能。依据奥米亚棕蝇听觉耦合结构的力学模型, 计算听觉结构振动的时域响应、频域响应和响应的相位差, 构建了仿生耦合处理系统的模型。分析了仿生耦合处理系统的性能, 结果显示: 通过设置合适的耦合参数, 该系统可处理任意频段的信号, 有效地增强信号间的相位差, 理想条件下相位差可被放大 18 倍左右。针对确定的耦合参数, 系统存在唯一的最敏感频率和最敏感入射角, 即当信号频率等于最敏感频率时, 耦合处理后的响应相位差可以达到 180° ; 当以最敏感入射角入射时, 响应相位差的变化率最大。该仿生耦合处理系统可采用两种体制测量方向: 即依据测量的耦合相位差直接测向和在最敏感频率和最敏感入射角概念的基础上利用基线旋转实现测向。文中的分析结果为仿生耦合处理系统的应用提供了理论基础。

关键词: 仿生耦合处理; 奥米亚棕蝇; 耦合听觉结构; 声源定位; 测向

中图分类号: TP391.9; Q811.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172509.2516

Biomimetic coupled processing system based on location mechanism of *Ormia ochracea*

HOU Yan-li^{1,2,3*}, XIA Ke-wen^{1*}, JI Xue-jun³

(1. School of Electronics and Information Engineering,
Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Institute of Information Science and Engineering,
Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

3. The 54th Research Institute of China Electronic Technology
Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

* Corresponding author, E-mail: houyanli26@126.com; kwxia@hebut.edu.cn

Abstract: *Ormia ochracea* with an extremely short baseline is able to locate its specific parasitoid host (cricket) precisely. On the fact mentioned above, this paper establishes a biomimetic coupled processing system based on the *Ormia ochracea* to improve the performance of miniature direction finding (DF) devices. According to the mechanical model of coupled auditory structure of the *Ormia ochracea*, the time domain response and frequency domain response of the auditory structure were

收稿日期: 2017-02-28; 修订日期: 2017-05-12.

基金项目: 河北省博士后科学基金重点资助项目 (No. B2016005006); 河北省自然科学基金资助项目 (No. 2016202341)

deduced and their phase difference responses were computed. Then, a signal processing model for biomimetic coupled processing system was established, and its performance was analyzed. The results show that proposed system can be used to handle arbitrary frequency signals and enhance the phase difference between signals by setting proper coupled parameters, particularly, the phase difference can be amplified about 18 times under ideal conditions. For certain coupled parameters, there exists the most sensitive frequency and the most sensitive incident angle in the system, namely, the most sensitive frequency makes the phase difference between responses arrive to 180° . Moreover, the gradient of phase difference between responses reaches its peak at the most sensitive incident angle. The biomimetic coupled processing system may adopt two kinds of mechanisms to measure directions: one is direct DF with the measurable phase differences, and the other is indirect DF by baseline rotating using the most sensitive frequency and the most sensitive incident angle concepts. This paper provides a theoretical foundation for much wider applications of the biomimetic coupled processing systems.

Key words: biomimetic coupled processing; ormia ochracea; coupled auditory structure; sound source orientation; direction finding

1 引言

随着航空电子侦察技术的发展,测向系统逐渐在有人机和无人机等空间有限的平台上搭载,因此对测向设备提出更高的要求——高精度和小型化,然而这两者是相互矛盾的,难以兼顾。根据各种仿生算法逐渐被应用于波达方向估计^[1-2],同时生物学研究表明具有超短基线的奥米亚棕蝇能精确定位其寄主,本文提出了基于奥米亚棕蝇的仿生耦合处理系统,并重点分析了该系统的性能,为同时实现测向设备的小型化与高精度奠定理论基础。

奥米亚棕蝇是一种寄生蝇,为了繁殖后代,受孕的雌性奥米亚棕蝇需要将幼虫放置在活野生蟋蟀身上,那么就需要在较短的时间内对蟋蟀进行较精确的定位^[3-4]。该寄生蝇在实现寄主定位时具有两大特点:(1)不像一般蝇子那样利用嗅觉器官定位目标,而是依靠蟋蟀夜间寻求交配时所发出的叫声来定位蟋蟀,即听觉器官的声源定位;(2)其听觉器官的跨度约为 1.2 mm,蟋蟀叫声的波长约为 7 cm,二者的严重失配使得到达其双耳的声信号的幅度相等且到达时间差极其微小,微小的差异不足以使寄生蝇的方向信息神经编码系统确定声源的方向,因此寄生蝇一定有一个特殊的听觉结构^[5-6]。R. N Miles 等人已经证明了寄生蝇的两耳间不是独立的,而是存在耦合连接,称为耦合听觉结构,并且他们为耦合听觉结构建立了一个简单的力学模型^[7]。在此力学模型基础上,许多研

究学者逐渐开始研究基于寄生蝇的声源定位结构^[8-10]和无线电测向^[11-13],但都没有更进一步研究该耦合结构的特性以及耦合参数的设置方法。

本文将寄生蝇的耦合听觉结构看成一个两输入-两输出系统,在其力学模型的基础上,分析系统的时域响应和频域响应,建立通用的仿生耦合处理系统模型,给出了设置耦合参数的方法,并提出了最敏感频率和最敏感入射角的概念,描述了两种基于仿生耦合处理的测向体制,为仿生耦合处理系统的进一步应用提供理论依据。该项研究对工程应用具有重要价值。

2 耦合听觉结构的响应分析

生物学研究表明,寄生蝇的两侧鼓膜不是独立的,而是通过鼓膜膜间桥在中心枢突处形成机械耦合连接。R. N Miles 等为寄生蝇的耦合听觉结构建立了一个简单的力学模型,如图 1 所示^[7]。

在该模型中,膜间桥两侧的所有运动部位等效成集中质量 m ,膜间桥两端的鼓膜、与鼓膜相连的表皮内突、球状听神经等的动态特性等效成弹簧-阻尼对 (k, c) ,膜间桥等效为由刚性系数为 k_3 、阻尼系数为 c_3 的扭转弹簧进行耦合连接的两段钢梁,那么该力学模型可以用质量矩阵 $\mathbf{M} = [m \ 0; 0 \ m]$ 、阻尼矩阵 $\mathbf{C} = [c + c_3 \ c_3; c_3 \ c + c_3]$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K} = [k + k_3 \ k_3; k_3 \ k + k_3]$ 来表征。 m 、 c 、 c_3 、 k 和 k_3 的取值取决于寄生蝇的生物听觉结构,一般取标准耦合参数^[7],如表 1 所示。

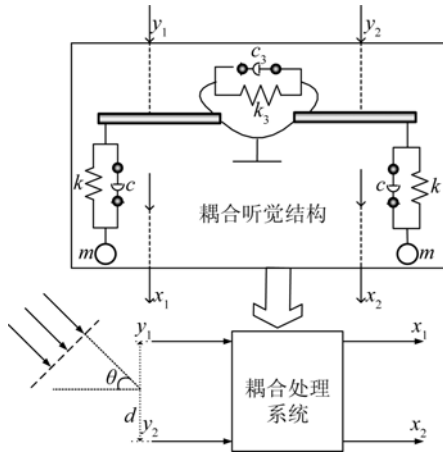


图 1 奥米亚棕蝇听觉系统的力学模型

Fig. 1 Mechanical model for auditory structure of Ormia ochracea

表 1 标准耦合参数

Tab. 1 Standard coupled parameters

参数	数值
m/kg	2.88×10^{-10}
$c/(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	1.15×10^{-5}
$c_3/(\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1})$	2.88×10^{-5}
$k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.576
$k_3/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	5.18

两侧鼓膜的中心间距 d 约为 1.2 mm, 声源传播方向与鼓膜平面法向的夹角为 θ , 蟋蟀发出频率为 5 kHz 的声音在两鼓膜处产生的声压信号为 $y = [y_1(t); y_2(t)]$, 两侧鼓膜在声压作用下将发生振动, 设鼓膜的振动位移为 $x = [x_1(t); x_2(t)]$, 则鼓膜振动的速度和加速度分别为 $\dot{x} = [\dot{x}_1(t); \dot{x}_2(t)]$ 和 $\ddot{x} = [\ddot{x}_1(t); \ddot{x}_2(t)]$ 。除了声压的作用, 鼓膜振动时还受到其它 3 种力的作用, 分别是惯性力、阻尼力和恢复力。设该振动为线性振动, 阻尼为黏性阻尼, 则惯性力为 $M\ddot{x}$, 恢复力为 Kx , 阻尼力为 $C\dot{x}$ 。根据牛顿第二定律, 建立该结构的运动方程^[14]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = y, \quad (1)$$

即:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c+c_3 & c_3 \\ c_3 & c+c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k+k_3 & k_3 \\ k_3 & k+k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由图 1 和式(2)都很容易看出, 寄生蝇的耦合听觉结构是一个两输入-两输出的系统, 作用在两鼓膜的声压信号为两输入, 两鼓膜的振动位移为两输出。下面求解该系统的响应。

2.1 时域响应

该系统的振动方程是一对具有耦合作用的微分方程, 利用直接积分法难于求解, 为得到响应的时域表达式, 可以采用模态分解法, 计算过程较复杂, 这里采用简单的状态空间法^[13]。

定义两鼓膜的位移和速度作为状态向量, 即定义状态向量:

$$Z(t) = [z_1, z_2, z_3, z_4]^T = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = [x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2]^T. \quad (3)$$

指定每个状态变量的初始值 $Z(t_0) = Z_0 = 0$, 将微分方程转化成状态方程和输出方程:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = A \cdot z(t) + B \cdot y(t) \\ \dot{x}(t) = D \cdot z(t) + E \cdot y(t) \end{cases}, \quad (4)$$

其中: A 是系统矩阵, B 是输入矩阵, D 是输出矩阵, E 是传输矩阵, 具体为:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{I}_{2 \times 2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ M^{-1} \end{bmatrix} \\ D = [\mathbf{I}_{2 \times 2} \quad \mathbf{0}_{2 \times 2}] \\ E = \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $\mathbf{0}_{2 \times 2}$ 表示二阶零矩阵, $\mathbf{I}_{2 \times 2}$ 表示二阶单位阵。利用 MATLAB 中的状态空间求解函数可以很方便地绘制出系统的时域响应, 观察响应的时域特性。

2.2 频域响应

设 $Y_1(\omega)$ 和 $Y_2(\omega)$ 表示声压信号 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的傅里叶变换, $X_1(\omega)$ 和 $X_2(\omega)$ 表示振动位移 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的傅里叶变换, 对式(2)两端进行傅里叶变换, 并整理得^[14]:

$$\begin{cases} X_1(\omega) = Y_1(\omega) \frac{N_1(\omega)}{P(\omega)} - Y_2(\omega) \frac{N_2(\omega)}{P(\omega)} \\ X_2(\omega) = Y_2(\omega) \frac{N_1(\omega)}{P(\omega)} - Y_1(\omega) \frac{N_2(\omega)}{P(\omega)} \end{cases}, \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} N_1(\omega) = m(j\omega)^2 + j(c+c_3)\omega + k+k_3 \\ N_2(\omega) = j\omega c_3 + k_3 \\ P(\omega) = N_1^2(\omega) - N_2^2(\omega) \end{cases}, \quad (7)$$

令 $Z_1(\omega)$ 表示两声压信号傅里叶变换之和, $Z_2(\omega)$ 表示两声压信号傅里叶变换之差, 即:

$$\begin{cases} Y_1(\omega) + Y_2(\omega) = Z_1(\omega) \\ Y_1(\omega) - Y_2(\omega) = Z_2(\omega) \end{cases}, \quad (8)$$

则:

$$\begin{cases} Y_1(\omega) = [Z_1(\omega) + Z_2(\omega)]/2 \\ Y_2(\omega) = [Z_1(\omega) - Z_2(\omega)]/2 \end{cases}. \quad (9)$$

将式(7)和(9)代入(6),并整理得:

$$\begin{cases} X_1(\omega) = \frac{Z_1(\omega)/2}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3)-m\omega^2} + \frac{Z_2(\omega)/2}{k+j\omega c-m\omega^2} \\ X_2(\omega) = \frac{Z_1(\omega)/2}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3)-m\omega^2} - \frac{Z_2(\omega)/2}{k+j\omega c-m\omega^2} \end{cases} \quad (10)$$

已知寄生蝇两耳间距极小,所以到达两鼓膜的声压信号 $Y_1(\omega)$ 和 $Y_2(\omega)$ 的幅度基本相等、相位差极其微小。由式(10)可以看出,两侧的输出响应可以看成是两部分响应的叠加:第一部分响应对应两输入信号的和信号,该和输入是永远存在的,意在使两侧产生等幅同相的振动;第二部分响应对应两输入信号的差信号,对于非 0° 入射角该差信号一直存在,意在使两侧产生等幅反相的

振动。两部分响应的叠加使得非 0° 入射角时两侧响应具有一定的幅度差和相位差。因此耦合结构增强了信号间的差异,下面推导两侧响应的相位差。

2.3 响应的相位差

为方便推导,这里设 $Y_1(\omega) = e^{j\omega\tau/2}$ 和 $Y_2(\omega) = e^{-j\omega\tau/2}$, 其中 $\tau = d \sin \theta / c_0$, c_0 为声波的传播速度,于是得到:

$$\begin{cases} X_1(\omega) = \frac{\cos(\omega\tau/2)}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3)-m\omega^2} + \frac{j\sin(\omega\tau/2)}{k+j\omega c-m\omega^2} \\ X_2(\omega) = \frac{\cos(\omega\tau/2)}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3)-m\omega^2} - \frac{j\sin(\omega\tau/2)}{k+j\omega c-m\omega^2} \end{cases} \quad (11)$$

两侧响应的相位差为:

$$\varphi_0(\theta) = \angle \left[\frac{X_1(\omega)}{X_2(\omega)} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{2\alpha\kappa}{1-\alpha^2(\kappa^2+\epsilon^2)} \right], \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \epsilon = \frac{\omega(k-m\omega^2)(c+2c_3)-\omega c(k+2k_3-m\omega^2)}{(k-m\omega^2)^2+\omega^2 c^2} \\ \alpha = \tan(\omega\tau/2) \\ \kappa = \frac{(k+2k_3-m\omega^2)(k-m\omega^2)+\omega^2 c(c+2c_3)}{(k-m\omega^2)^2+\omega^2 c^2} \end{cases} \quad (13)$$

寄生蝇双耳接收寄主声音信号时,耦合结构参数、信号频率和双耳间距都是确定的,那么根据测得的耦合后两侧响应的相位差和式(12)便可估计入射角。

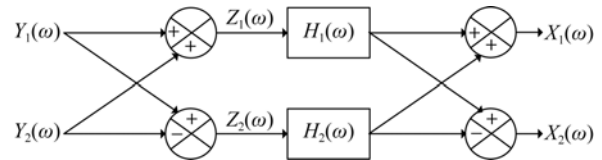


图2 仿生耦合处理系统模型

Fig.2 Model of biomimetic coupled processing system

3 仿生耦合处理系统

模拟寄生蝇听觉结构的原理,建立了能够增强信号间相位差的仿生耦合处理系统。

令:

$$\begin{cases} H_1(\omega) = \frac{1/2}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3)-m\omega^2} \\ H_2(\omega) = \frac{1/2}{k+j\omega c-m\omega^2} \end{cases} \quad (14)$$

依据式(10)可得仿生耦合处理系统的模型如图2所示。

由图2可以看出信号的耦合处理效果取决于 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$, 对于频带非常窄的信号或单一频率信号来说,耦合处理效果完全受控于耦合参数。因此,为达到一定的相位差增强效果,需要正确地设置耦合参数。已知寄生蝇的耦合结构对其寄主声源频率 ω_0 (5 kHz) 敏感,当拟对频率为 ω_1 的信号进行仿生耦合处理时,依据式(14),可保持标准参数 m 不变, c 和 c_3 设置为原标准参数的 (ω_1/ω_0) 倍、 k 和 k_3 为原标准参数的 $(\omega_1/\omega_0)^2$ 倍,同时取基线波长比 $d/\lambda = 0.017$,将得到与寄生蝇耦合听觉结构相同的相位差增强效果,从而有助

于实现测向设备的小型化和高性能的兼顾,便于设备的移动应用和空间有限平台的载荷。

3.1 系统的最敏感频率

由式(12)和(13)可知,响应的差异将随入射波频率的变化而变化,即仿生耦合处理系统对不同频率的敏感性是不同的,那么是否存在一个频率使得相位差响应为 180° 。为了进一步分析仿生耦合处理系统的特性,提出“最敏感频率”的概念,所谓最敏感频率,就是使两侧响应的相位差达最大(180°)的频率。

令:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1(\omega) = \frac{j\sin(\omega\tau/2)}{k+j\omega c - m\omega^2} \\ \mathbf{R}_2(\omega) = \frac{\cos(\omega\tau/2)}{k+2k_3+j\omega(c+2c_3) - m\omega^2} \end{cases} \quad (15)$$

设 $\mathbf{R}_1(\omega)$ 和 $\mathbf{R}_2(\omega)$ 的相位分别是 φ_1 和 φ_2 , 则二者的相位差 $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ 。以矢量 $\mathbf{R}_1(\omega)$ 为基准,画出 $\mathbf{R}_2(\omega)$, 根据式(11)进行矢量合成得到 $\mathbf{X}_1(\omega)$ 和 $\mathbf{X}_2(\omega)$, 示意图如图 3 所示。 φ_0 是响应

$$\omega_p^2 = \frac{2mk+2mk_3 - c^2 - 2cc_3 - \sqrt{(c^2+2cc_3-2mk-2mk_3)^2 - 4m^2(k^2+2kk_3)}}{2m^2} \quad (17)$$

由式(17)可知,仿生耦合处理系统的最敏感频率只取决于耦合参数,与入射波频率、入射角和阵元间距无关。根据已知的标准耦合参数可以计算得到寄生蝇听觉系统的最敏感频率为 $\omega_p = 52\,414 \text{ rad/s}$ ($f_p = 8\,341.9 \text{ Hz}$)。

3.2 系统的最敏感入射角

若测向系统采用的是基于相位差的测向体制,即根据测量的相位差来确定辐射源的方向,通常不同入射角情况下的测向精度是不同的。一般情况下,入射方向越靠近天线阵的法向,精度越高,而相位差曲线的斜率大小可以很好地体现测向精度的高低。这里提出仿生耦合系统的最敏感入射角概念,当入射角等于最敏感入射角 θ_p 时,相位差曲线的斜率最大。当入射波的频率等于最敏感频率时,若 $|\mathbf{R}_1(\omega)| \leq |\mathbf{R}_2(\omega)|$, 则 $\varphi_0 = 0^\circ$; $|\mathbf{R}_1(\omega)| > |\mathbf{R}_2(\omega)|$, $\varphi_0 = 180^\circ$ 。那么 $|\mathbf{R}_1(\omega)| = |\mathbf{R}_2(\omega)|$ 使相位差由 0° 跳变至 180° , 即相位差曲线的斜率最大, $|\mathbf{R}_1(\omega)| = |\mathbf{R}_2(\omega)|$ 意味着:

$$\tan \frac{\omega\tau}{2} = \frac{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k+2k_3-m\omega^2)^2 + (c\omega+2c_3\omega)^2}} \quad (18)$$

已知 $\tau = d \sin \theta / c_0$, 因此由式(18)可以解出系

$\mathbf{X}_1(\omega)$ 和 $\mathbf{X}_2(\omega)$ 间的相位差。

由图 3 可以看出, $\varphi_0 = 180^\circ$ 的必要条件是 $\varphi_{12} = 0^\circ$, 即 $\varphi_1 = \varphi_2$, 则 $\tan \varphi_1 = \tan \varphi_2$, 依据式(15), 有:

$$m^2 \omega^4 + (c^2 + 2cc_3 - 2mk - 2mk_3) \omega^2 + k^2 + 2kk_3 = 0, \quad (16)$$

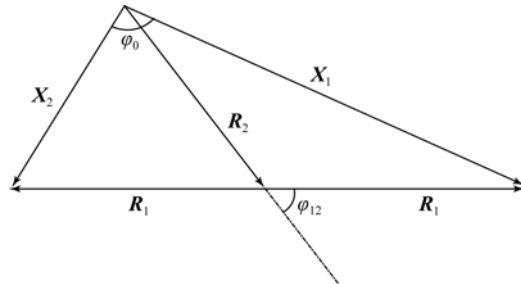


图 3 响应的矢量合成

Fig. 3 Vector synthesis of responses

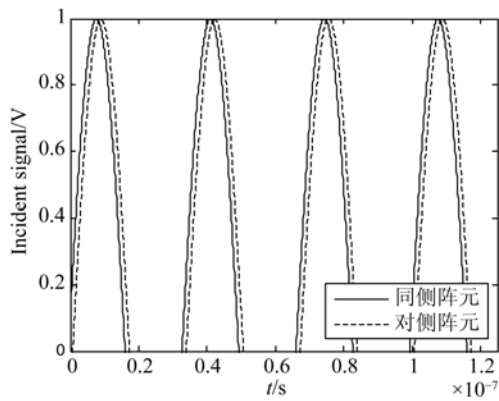
解方程可以得到仿生耦合处理系统的最敏感频率如式(17)所示:

统的最敏感入射角 θ_p 。式(18)表明 θ_p 不仅取决于耦合参数,还与入射波频率和阵元间距无关。将已知参数带入上式得寄生蝇听觉系统的最敏感入射角 $\theta_p = 0.706\,5 \text{ rad} = 40.479\,5^\circ$ 。

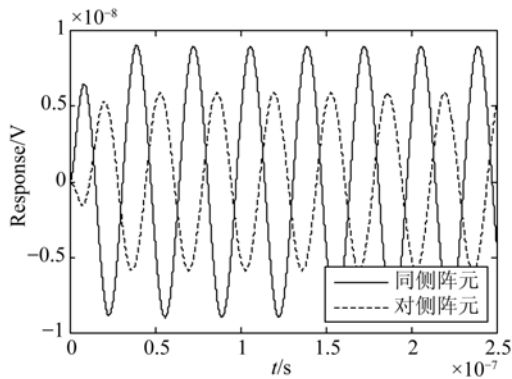
4 仿真与分析

利用间距较小的两阵元接收频率为 30 MHz 的远场信号,对接收到的信号进行仿生耦合处理,分别在时域和频域观察系统的输出响应。

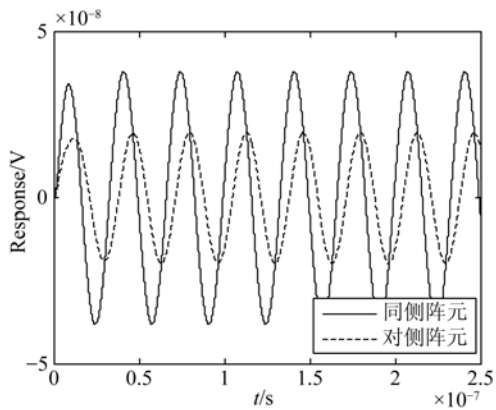
由式(12)和式(13)可知,阵元间距将直接影响相位差响应,一般来说,阵元间距越大,相位差响应曲线越陡峭,测向精度越高,但所需的阵元数越多,因此具体应用时应综合考虑,这里与寄生蝇听觉耦合结构一致,阵元间距设置为 0.017 倍的信号波长(0.17 m)。基于信号频率与寄生蝇寄生声源频率的关系,设置耦合参数 $m = 2.88 \times 10^{-10} \text{ kg}$, $c = 0.069 \text{ Ns/m}$, $c_3 = 0.173 \text{ Ns/m}$, $k = 2.07 \times 10^7 \text{ N/m}$, $k_3 = 1.86 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。在 MATLAB 中利用状态空间法得到仿生耦合处理系统的输入信号、输出的时域瞬态响应如图 4 所示。



(a)入射角 $\theta=50^\circ$ 时的输入激励信号
 (a) Incident signals with $\theta=50^\circ$



(b)入射角 $\theta=50^\circ$ 时的输出响应信号
 (b) Responses with $\theta=50^\circ$



(c)入射角 $\theta=10^\circ$ 时的输出响应信号
 (c) Responses with $\theta=10^\circ$

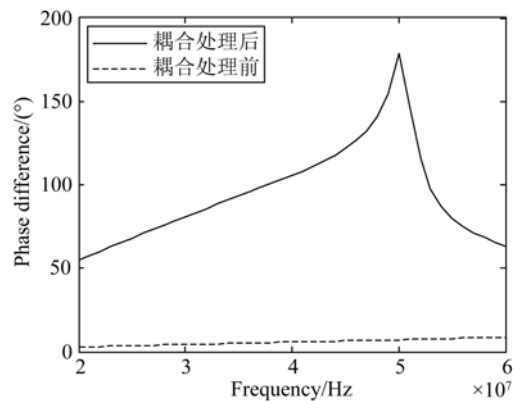
图 4 时域输入和瞬态响应

Fig. 4 Incident signals and transient responses in time domain

图 4 中,入射角为 50° 时的输入信号时间差为 $4.34 \times 10^{-4} \mu\text{s}$,经耦合处理后输出信号的时间差为 $8 \times 10^{-3} \mu\text{s}$,时间差被放大 18.4 倍;入射角为 10° 时的输入信号时间差为 $9.84 \times 10^{-5} \mu\text{s}$,经耦合处理后输出信号的时间差为 $1.8 \times 10^{-3} \mu\text{s}$,时间差被放大 18.3 倍。可见,仿生耦合处理系统有

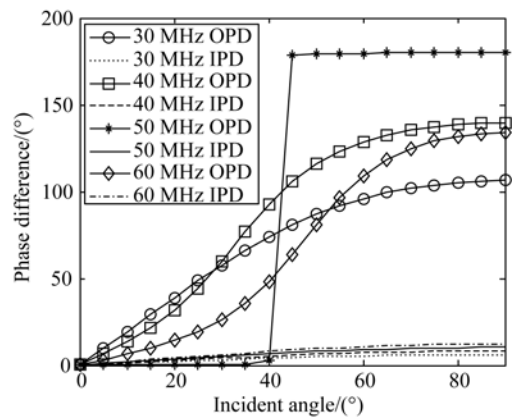
效地放大了输入信号间的时间差,且被放大的时间差与无线电波的入射方向有关,因此可以依据入射角与耦合处理后输出信号间时间差(或相位差)的对应关系来确定无线电波的方向。

将耦合参数代入式(17)和式(18)可得此仿生耦合系统的最敏感频率为 50.1 MHz、最敏感入射角为 40.48° ,也就是说信号频率越靠近 50.1 MHz,仿生耦合系统越敏感,即放大效果越显著;当入射角为 40.48° 时,相位差的变化率最大。保持耦合参数不变,观察输出响应的相位差随入射波频率(20~60 MHz)和入射角($0^\circ \sim 90^\circ$)的变化曲线,如图 5(a)所示。由图 5(a)可以看出,仿生耦合处理增强了信号间的相位差;随着频率的增加,耦合后的相位差先增加而后减小,在 50 MHz 左右取得最大值,与计算结果一致。



(a)响应的相位差随频率的变化

(a) Phase difference response with frequency



(b)响应的相位差随随入射角的变化

(b) Phase difference responses with incident angles

图 5 耦合处理后的频域响应

Fig. 5 Coupled responses in frequency domain

图 5(b)中绘制了信号频率分别为 30、40、50 和 60 MHz 时,耦合处理前后的两阵元信号间的相位差曲线,其中 OPD (Output Phase Difference)表示输出响应间的相位差,IPD(Input Phase Difference)表示输入信号间的相位。由图 5(b)可以看出,针对任意频率的入射信号,对于 0° 以外的任意入射角,仿生耦合处理系统增强了阵元间信号响应的相位差,且入射角与相位差间是一一对应的关系,因此可以依据测量的耦合后相位差来确定无线电波的入射方向。特别地,当信号频率为 30 MHz 和入射角在 $(0^\circ, 45^\circ)$ 时,相位差被线性放大 18 倍左右。此仿真中耦合参数是针对 30 MHz 频率设置的,实际上当采用文中提出的耦合参数设置方法时,与未经仿生耦合处理的信号相比,经仿生耦合处理的任何频率信号都可以在 $(0^\circ, 45^\circ)$ 内获得 18 倍左右的相位差增强效果。另外,当信号频率为 50 MHz 时,相位差曲线在 41° 附近时最为陡峭,即斜率最大,测向精度最高。根据仿生耦合处理系统的这一特性,可以有另外一种测向体制:设置恰当的耦合参数使系统最敏感频率等于信号频率,利用式(18)可计

算得到最敏感入射角,将两阵元所在的基线旋转一周,找到相位差曲线斜率取得最大值时基线转过的角度,根据最敏感入射角和基线转过的角度即可确定辐射源的方向。

5 结 论

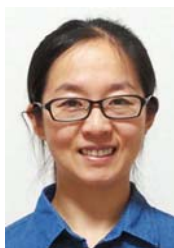
基于奥米亚棕蝇的听觉结构,构建了仿生耦合处理系统的模型;通过正确地设置耦合参数,该系统可有效增强任何频段信号间的相位差;且当取基线波长比为 0.017 时,仿生耦合处理系统可以获得与奥米亚棕蝇听觉结构相同的相位差放大效果,理想条件下信号的相位差可被放大 18 倍左右。对于确定的耦合参数,该系统存在唯一的最敏感频率和最敏感入射角,使得输出响应相位差的变化率最大。基于仿生耦合处理系统的特性,该系统可以应用于空间受限的小型化测向系统,以增强短基线阵列接收信号间的相位差,并且可以采用基于测量相位差的直接测向体制,或基于基线旋转的间接测向体制,基于仿生耦合处理的短基线测向将作为下一步的研究目标。

参考文献:

- [1] 单泽彪,石要武,刘小松,等. 应用人工蜂群算法的动态波达方向跟踪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3):838-845.
SHAN Z B, SHI Y W, LIU X S, *et al.*. DOA tracking of moving targets by artificial bee colony algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 838-845. (in Chinese)
- [2] 张志成,林君,石要武,等. 用加权子空间拟合和量子粒子群算法联合估计多普勒频率和波达方向[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9):2445-2451.
ZHANG ZH CH, LIN J, SHI Y W, *et al.*. Joint estimation of Dopplers and DOAs by WSF-QPSO method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2445-2451. (in Chinese)
- [3] 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, 142.
WANG Q SH, RAO ZH SH, TA N. Mechanism of a mini-instrument for sound source localization [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(4):122-129, 142. (in Chinese)
- [4] 戴红飞,杨秋翔,秦品乐,等. 仿生 MEMS 声定位传感器的设计与仿真[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11):2985-2990.
DAI H F, YANG Q X, QIN P L, *et al.*. Design and simulation of bionic MEMS sound localization sensor [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(11):2985-2990. (in Chinese)
- [5] 塔娜,饶柱石. 奥米亚寄生蝇声源定位系统力学模型研究[J]. 振动与冲击, 2016, 25(S):167-169.
TA N, RAO ZH SH. Mechanical models of sound localization in the parasitoid fly *Ormia ochracea* [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 25(S):167-169. (in Chinese)
- [6] 王庆生,塔娜,饶柱石. 微型生物听觉定位系统的力学模型研究[C]. 第九届全国振动理论及应用学术会议暨中国振动工程学会成立 20 周年庆祝大会论文汇编, 中国振动工程学会, 2007:131-138.
WANG Q SH, TA N, RAO ZH SH. An analytic model of subminiature auditory sensation system for sound source localization [C]. *The 9th Vibration Theory and Application Conference Proceedings*, Chinese Society of Vibration Engineering, 2007: 131-138. (in Chinese)

- [7] 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.
- [8] 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):EL270.
- [9] KUNTZMAN M L, HALL N A. Sound source localization inspired by the ears of the *Ormia ochracea* [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(3):033701.
- [10] 安鹏, 苑伟政, 任森. 仿生声压梯度敏感结构设计及加工方法研究[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(6):777-781.
AN P, YUAN W ZH, REN S. Design and microfabrication of biomimetic acoustic pressure gradient sensitive structure [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(6):777-781. (in Chinese)
- [11] MASOUMI A R, YUSUF Y, BEHDAH N. Biomimetic antenna arrays based on the directional hearing mechanism of the parasitoid fly *Ormia ochracea* [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(5):2500-2510.
- [12] BEHDAD N, LI M, AL-JOUMAYLY M. Biologically-inspired antenna arrays based on the hearing mechanism of the parasitoid fly *Ormia ochracea* [C]. 2011 *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, IEEE, 2011:1526-1529.
- [13] MASOUMI A R, BEHDAD N. An improved architecture for two-element biomimetic antenna arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(12):6224-6228.
- [14] 张相庭, 王志培, 黄本才. 结构振动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994:61-120.
ZHANG X T, WANG ZH P, HUANG B C. *Structural Vibration Mechanics* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1994:61-120. (in Chinese)
- [15] 徐斌, 高跃飞, 余龙. MATLAB有限元结构动力学分析与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009:26-50.
XU B, GAO Y F, YU L. *The Finite Element Structural Dynamics Analysis and Engineering Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009:26-50. (in Chinese)
- [16] AKCAKAYA M, MURAVCHIK C H, NEHORAI A. Biologically inspired coupled antenna array for direction-of-arrival estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10):4795-4808.

作者简介:



侯艳丽(1981—),女,黑龙江克山人,博士后,讲师,2003年、2006年和2008年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事基于仿生学的无线电测向方面的研究。E-mail: houyanli26@126.com

导师简介:



夏克文(1965—),男,湖南武冈人,教授,博导,博士后导师,2003年、2006年于西安交通大学分别获得博士学位和博士后证,主要从事计算智能与无线通信技术研究。E-mail: kwxia@hebut.edu.cn