

# 基于 2 台双声道录音设备的声源定位精度分析

田 苗 夏灿玮<sup>†</sup>

(生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京师范大学生命科学院, 100875, 北京)

**摘要** 利用声音定位野生动物, 是一种低干扰、非损伤的监测方式, 在动物研究中有广泛的应用。已有的动物声音定位装置需要对录音设备进行较大的改造, 这提高了声音定位系统使用的成本。本文介绍的声音定位系统, 基于 2 台户外常用的双声道录音设备, 通过延长话筒到录音机的数据传输线, 以实现声源的定位, 该定位系统在硬件改造上的花费极少。文中探讨了定位系统布设的方式: 以同一台录音机的 2 个话筒的连线作为基线, 当 2 条基线中点重合时有效监测范围达到最大。并基于定位误差的分析, 提出了在实际应用中降低定位误差的建议: 精确定位话筒位置、减小时间测量的误差、在能够获取录音的前提下尽可能延长基线长度、基线延长线避开监测动物频繁活动的区域、考虑环境温度对声速的影响等。采用该设备对播放的山麻雀(*Passer cinnamomeus*)和黄腹山雀(*Pardaliparus venustulus*)各 50 句鸣声进行定位, 误差分别为(0.806±0.259)(均值±标准差)m 和(0.781±0.293)m, 满足实际应用的需求。

**关键词** 声音定位系统; 误差; 双曲线定位; 监测

**中图分类号** Q958; O429

**DOI:** 10.12202/j.0476-0301.2021062

## 0 引言

声音通信是动物交流的重要手段<sup>[1-2]</sup>。利用声音传递到录音设备的时间差, 可以定位声源的位置, 从而实现对动物活动位置的监测<sup>[3-4]</sup>。利用该技术已对鸟类、蝙蝠和两栖类动物开展近百项野外研究<sup>[5]</sup>, 定位误差通常为 1~6 m<sup>[5-7]</sup>, 研究问题涉及识别动物个体<sup>[8-9]</sup>、追踪个体间互动<sup>[10-11]</sup>、量化鸣声的音量<sup>[12-13]</sup>、调查动物密度<sup>[14-15]</sup>、探究动物的栖息地选择<sup>[16-17]</sup>等。

为了准确地得到时间差, 需要同步不同录音设备的内置时间。不同设备的时间同步可采用多种方式, 如: 高精度时钟芯片实现自动时间对准, 基于 GPS 接收卫星信号实现时间同步, 利用网络同步时间<sup>[18]</sup>。在动物声音定位研究中多使用如下 2 种方式实现不同录音设备时间的同步: 1) 将至少 3 个话筒的录音传递到同 1 台录音机<sup>[19-21]</sup>; 2) 通过 GPS 接收卫星信号同步不同录音机的内置时间<sup>[5-7]</sup>。将多个话筒的录音传递到 1 台录音机, 要求录音机至少有 3 个声道, 无法适用于动物监测中普遍使用的双声道录音机<sup>[6]</sup>。而 GPS 同步时间会受到地形和生境的限制<sup>[5]</sup>。在山地或茂密植被的生境, GPS 接收的信号较弱, 使得利用卫星信号同步录音机时间的成功率降低。使用 GPS 同步不同录音机的内置时间, 需要给每台录音机配备 1 个 GPS<sup>[6]</sup>, 增加了硬件的成本。

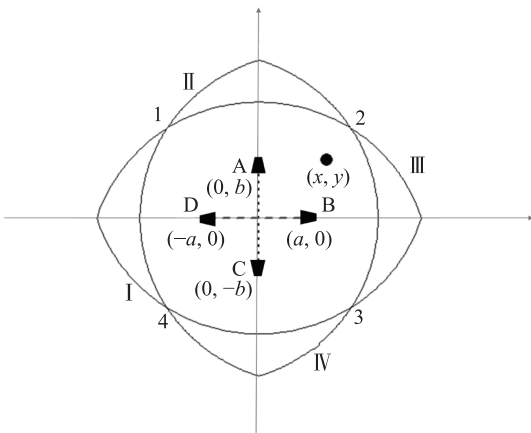
本文提出一种基于 2 台双声道录音机定位声源的方法, 该定位方法不需要同步不同录音机的内置时间, 可以在最大程度上减少硬件的改造。动物通常有较为固定的活动高度(如地面、灌木层、树冠层等)<sup>[22-23]</sup>, 通过调节录音设备的高度, 可以使得动物与录音设备近似处于同一平面。对于平面声源的定位, 利用声音传递到同一台录音机 2 个话筒的时间差, 可以确定声源所在的双曲线。2 台录音机各自得到的双曲线的交点即为声源的位置。该方法要求 2 台录音机的 4 个话筒都录到同一声源。考虑到声音的衰减限制了录音的距离, 先探讨定位系统的布设方式, 以提高声音定位的精度和监测范围; 然后对不同使用条件下声源定位的精度展开分析; 最后利用实例检验该定位系统的精度。

## 1 定位系统布设

将连接到同 1 台录音机的 2 个话筒的连线作为基线。对于话筒的布设方式, 考虑 2 个变量: 2 条基线的夹角; 2 条基线中点的位置。基于仿真分析, “2 条双曲线尽可能正交, 从而减小定位误差, 提高定位精度”<sup>[24]</sup>, “布局时不要使两基线夹角过小或过大”<sup>[25]</sup>。基于上述结论, 考虑 2 条基线夹角为 90°, 即正交时的话筒布设。采用该方法, 使得基线位于 2 条正交的坐标轴上, 也便于简化声源位置的求解。

<sup>†</sup> 通信作者: 夏灿玮(1984—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 鸟类行为。E-mail: xiacanwei@bnu.edu.cn  
收稿日期: 2021-03-21

图 1 中的曲线 (I、II、III、IV) 分别是以话筒 (A、B、C、D) 为圆心, 有效录音距离为半径的圆弧, 曲线的 4 个交点 (1、2、3、4) 围成的区域为该声音定位系统的有效监测范围. 曲线 I 在第四象限为增函数, 在第三象限为减函数; 而曲线 III 在第一象限为减函数, 在第二象限为增函数. 当 2 条基线中心重合以后, 连接话筒 B 和 D 的基线向右移动, 在第一象限和第四象限减少的面积大于在第二象限和第三象限增加的面积; 而连接话筒 B 和 D 的基线向左移动, 在第一象限和第四象限增加的面积小于在第二象限和第三象限减小的面积. 同理, 上、下移动连接话筒 A 和 C 的基线, 亦会降低有效录音范围. 可见, 当 2 条基线中心重合时, 有效录音范围最大.



黑色梯形示意话筒; 圆点示意声源; 曲线 (I、II、III、IV) 示意话筒 (A、B、C、D) 的录音范围; 曲线交点 (1、2、3、4) 围成的区域为监测范围; 括号中的数字示意话筒或声源的坐标.

图 1 声音定位系统的布设

## 2 声源定位及误差

由图 1 中的几何关系, 可知声源的坐标  $(x, y)$  满足如下公式:

$$\sqrt{(x+a)^2 + y^2} - \sqrt{(x-a)^2 + y^2} = v \cdot t_1, \quad (1)$$

$$\sqrt{x^2 + (y+b)^2} - \sqrt{x^2 + (y-b)^2} = v \cdot t_2, \quad (2)$$

式中的  $a$  和  $b$  为话筒到坐标原点的距离 (见图 1),  $v$  是声速,  $t_1$  是声音传递到话筒 B 和 D 的时间差,  $t_2$  是声音传递到话筒 A 和 C 的时间差. 由式 (1) 和式 (2) 可求解声源的坐标, 即

$$x = \frac{\sqrt{16a^2b^2v^2t_1^2 - 4a^2v^4t_1^2t_2^2 - 4b^2v^4t_1^4 + v^6t_1^4t_2^2 + 4b^2v^4t_1^2t_2^2 - v^6t_1^2t_2^4}}{64a^2b^2 - 16a^2v^2t_2^2 - 16b^2v^2t_1^2}, \quad (3)$$

$$y = \frac{\sqrt{16a^2b^2v^2t_2^2 - 4b^2v^4t_1^2t_2^2 - 4a^2v^4t_2^4 + v^6t_1^2t_2^4 + 4a^2v^4t_1^2t_2^2 - v^6t_1^2t_2^4}}{64a^2b^2 - 16a^2v^2t_2^2 - 16b^2v^2t_1^2}. \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可知, 声源定位的精度受到话筒的坐标、声速和声音传递时间差的共同影响. 对各变量不确定度的分量求和得

$$\Delta x = \left| \frac{\partial x}{\partial a} \cdot \Delta a \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial b} \cdot \Delta b \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial v} \cdot \Delta v \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial t_1} \cdot \Delta t_1 \right| + \left| \frac{\partial x}{\partial t_2} \cdot \Delta t_2 \right|, \quad (5)$$

$$\Delta y = \left| \frac{\partial y}{\partial a} \cdot \Delta a \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial b} \cdot \Delta b \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial v} \cdot \Delta v \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial t_1} \cdot \Delta t_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial t_2} \cdot \Delta t_2 \right|. \quad (6)$$

定位的误差以声源实际位置与定位位置的距离衡量, 即

$$\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}. \quad (7)$$

## 3 定位精度分析

按照图 1 布设定位系统, 以 2 条基线的交点为坐标轴的  $O$  点. 将横、纵坐标  $-50 \sim 50$  m 的区域划分为 10000 个  $1 \text{ m}^2$  的单元格, 考虑声源出现在每个单元格中心时的定位误差. 由式 (5)~(7) 计算定位误差, 需要对各变量及其测量误差进行赋值. 先考虑最理想的条件下, 动物研究中各变量及其测量误差的取值. 然后放宽限制因素, 考虑不同条件下的取值.

条件 1: 话筒距离  $O$  点设置为 30 m, 即  $a=b=30$ . 此时话筒距离衡量区域的最远距离 (话筒与监测区域最远顶点的距离) 为 94.3 m, 接近户外动物录音设备 (如美国 Wildlife Acoustics 公司的 SM4 录音机) 有效录音距离的极限<sup>[26-28]</sup>. 进一步增加基线的长度, 将导致声音定位系统监测范围的降低. 声速  $v$  设置为  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应 1 个标准大气压、温度  $14 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 20% 的空气中的声速. 声音到达话筒的时间差 ( $t_1$  和  $t_2$ ) 由声源实际位置到话筒的距离差决定. 话筒位置的测量误差 ( $\Delta a$  和  $\Delta b$ ) 设置为 0.1 m, 反映使用差分 GPS 定位话筒位置的精度. 声速的误差  $\Delta v$  设置为  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应记录了温度但未测量湿度和大气压时声速的误差. 利用软件 (如德国 Avisoft Bioacoustics 的 Avisoft 声音分析软件) 自动测量时间差的精度可达到  $10^{-6}$  s, 但考虑到动物并不严格和话筒处于同一平面, 这会引起测量时间差的误差, 故将声音到达话筒时间差的误差 ( $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ ) 设置为 0.0001 s. 计算依据如下: 若声源距离话筒所在平面 2 m, 且话筒所在平面的投影与 2 个话筒的实际距离分别为 20 和 30 m, 实际声音传递的

时间差为 0.02931 s, 而假定声源位于话筒所在平面时声音传递的时间差为 0.02941 s, 二者相差 0.0001 s.

条件 2: 话筒距离零点设置为 15 m, 即  $a=b=15$ , 其他数值同条件 1. 当采用有线传输时, 基线长度的减少, 有助于减少话筒与录音机之间的连线. 当采用无线传输时, 基线长度的减少, 可以减少信号的衰减, 降低对硬件的要求. 总之, 当基线长度减少后, 便于在户外布设声音定位系统.

条件 3: 声速的误差  $\Delta v$  设置为  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其他数值同条件 1. 温度改变  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 空气声速变化约  $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . 若未记录环境温度, 且环境温度变化达  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 此时声速改变达到  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

条件 4: 话筒位置的测量误差 ( $\Delta a$  和  $\Delta b$ ) 设置为 2 m, 其他数值同条件 1. 户外布设声音定位系统, 若采用手机内置 GPS 定位话筒位置, 定位误差可  $\geq 2 \text{ m}$ .

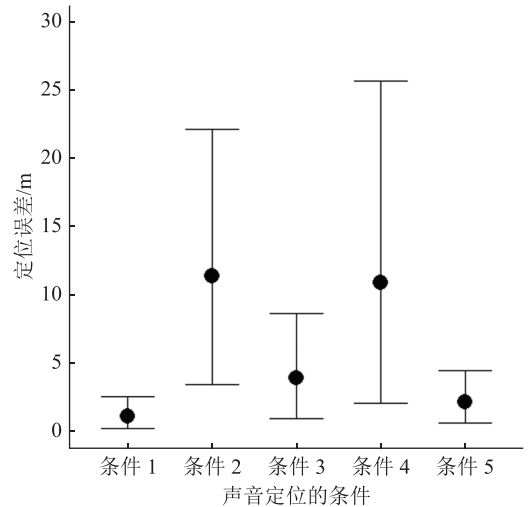
条件 5: 声音到达话筒时间差的误差 ( $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ ) 设置为 0.001 s, 其他数值同条件 1. 常用动物声音分析软件 (如德国 Avisoft Bioacoustics 的 Avisoft 声音分析软件) 手动测量的精度为 0.001 s, 故此处设置误差为 0.001 s.

由双曲线定位的性质可知, 当声源接近基线延长线时, 定位误差无限增大<sup>[4, 24]</sup>. 故此, 我们汇报定位误差的中位数和上、下四分位数, 而非受极端值影响的均值和标准差. 由图 2 可见, 条件 1 时的定位误差为 1.18、0.29~2.63 m (中位数, 下四分位数~上四分位数). 条件 2、3、4、5 虽然便于声音定位系统在户外的布设和使用, 但均增加了定位的误差.

在条件 2 和 4 的情境下, 定位误差的中位数超过 10 m (图 2), 无法达到实际研究中对定位精度的要求<sup>[5-7]</sup>, 故没有进一步分析. 在条件 1、3 和 5 的情境下, 不同位置声源的定位误差见图 3. 声源位于以话筒为顶点的菱形区域内, 定位较为准确, 其误差  $< 1 \text{ m}$ . 声源超出以话筒为顶点的菱形区域, 定位误差将逐渐增大. 随着声源接近话筒连线的延长线, 定位误差将急剧增大.

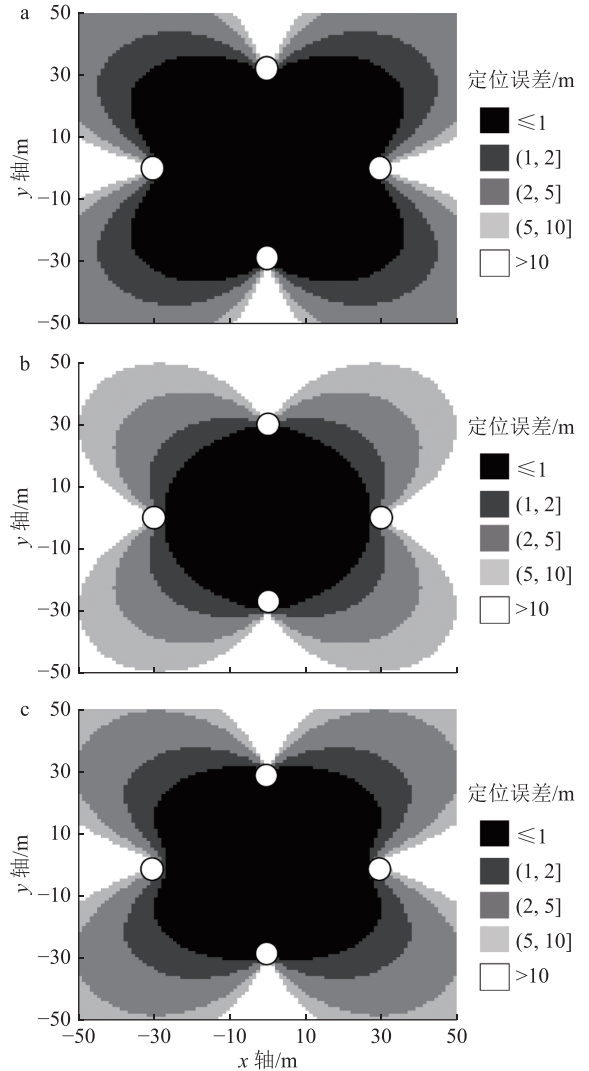
### 4 定位精度测试

模仿条件 1 进行声音定位精度的测试. 该研究于 2021 年 6 月 18 日上午在北京师范大学京师广场 ( $39.9646^\circ\text{N}$ ,  $116.3752^\circ\text{E}$ ) 进行. 京师广场有东西方向约 100 m、南北方向约 120 m 的不连续草坪, 并种植有乔木. 利用音频线将 MKH416P48 (Sennheiser 公司, 德国) 和 SGC-568 指向性话筒 (广东得胜电子有限公司, 中国) 连接到双声道的 DR-100MKIII 录音机 (Tascam 公司, 日本) 和 DR-44WL 录音机 (Tascam 公司, 日



圆点示意中位数, 横线示意上、下四分位数, 不同条件下的变量赋值详见正文.

图 2 定位声源位置的误差



白色圆圈示意话筒的位置, 不同条件下的变量赋值详见正文.

图 3 不同位置在条件 1 (a)、条件 3 (b) 和条件 5 (c) 的定位误差

本). 话筒固定在距地高 1.5 m 的三脚架上. 第 1 台录音机的 2 个话筒沿着东西方向布设, 另一台录音机的 2 个话筒沿着南北方向布设, 使得连接话筒的两条基线正交(图 1). 利用 D5 测距仪(Leica 公司, 瑞士)测量连接同一台录音机的 2 个话筒间的距离, 分别为 65(东西方向)和 51 m(南北方向).

仿照王代平等<sup>[7]</sup>的研究, 播放北京地区常见的 2 种鸟类(山麻雀 *Passer cinnamomeus*、黄腹山雀 *Pardaliparus venustulus*)的叫声, 以测试声音定位的精

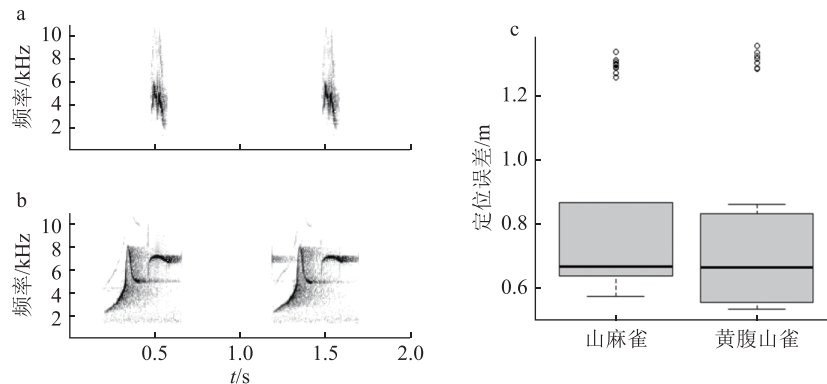


图 4 山麻雀叫声语图 (a)、黄腹山雀叫声语图 (b)、定位误差 (c)

山麻雀叫声定位误差为  $(0.806 \pm 0.259)$  (均值  $\pm$  标准差) m, 黄腹山雀叫声定位误差为  $(0.781 \pm 0.293)$  m. 王代平等<sup>[7]</sup>研究中, 山麻雀定位误差为  $(1.01 \pm 0.33)$  m, 黄腹山雀定位误差为  $(1.70 \pm 0.89)$  m, 与本研究结果大体相当.

## 5 讨论和总结

声音定位在动物研究中有广泛的应用. 本文基于 2 台双声道录音机, 只需要延长话筒到录音机的数据传输线即可实现声源位置的定位. 相比于将 3 个及以上的话筒连接到同一台录音机, 和 GPS 接收卫星信号同步不同录音机的内置时间, 本文介绍的方法在硬件改造上的花费最少. 采用该方法对山麻雀和黄腹山雀的鸣声进行定位, 误差分别为  $(0.806 \pm 0.259)$  m 和  $(0.781 \pm 0.293)$  m, 满足实际应用的需求.

为了提高声音定位的精度和监测的范围, 我们提出如下的建议. 其中前 4 条建议对声源定位误差影响较大, 需要在实际应用中优先考虑.

1) 以同一台录音机的 2 个话筒的连线为基线, 2 条基线尽可能正交, 且基线的中点重合.

2) 在确保能获取录音的前提下, 尽可能地增加基线的长度.

3) 声源接近基线延长线时定位误差将急剧增加, 因此, 在布设声音定位系统时, 要尽可能避免基线延

度. 研究区域选择了 5 个点, 每个点利用 BV200 音箱(深圳市不见不散电子有限公司, 中国)播放山麻雀和黄腹山雀叫声(图 4-a、b)各 10 次. 利用 Avisoft 声音分析软件(Avisoft Bioacoustics, 德国)测量声音到达不同话筒的时间差. 基于式(1)和(2), 利用 R 语言“BB”包的“dfsane”函数求解方程得出声源位置<sup>[29]</sup>. 求解方程时的声速设置为  $347.896 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应开展研究时  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  的空气中声速. 定位误差为求解得出的声源位置与实际播放声音位置的直线距离.

长线正对被监测动物频繁活动的区域.

4) 采用差分 GPS 定位话筒的坐标, 以减少话筒位置的定位误差.

5) 减少声音传递到不同话筒时间差的测量误差. 建议采用软件自动测量声音的时间差.

6) 测量录音时的环境温度, 以更准确地估算声速.

## 6 参考文献

- [1] SLATER P J B. Fifty years of bird song research: a case study in animal behaviour[J]. *Animal Behaviour*, 2003, 65(4): 633
- [2] BAKER M C. Bird song research: the past 100 years[J]. *Bird Behavior*, 2001, 14(1): 3
- [3] WILSON D R, BATTISTON M, BRZUSTOWSKI J, et al. Sound finder: a new software approach for localizing animals recorded with a microphone array[J]. *Bioacoustics*, 2014, 23(2): 99
- [4] 薛睿超, 杨燕明, 王先艳, 等. 浅水海豚三维空间定位与发声源级测量[J]. *声学学报*, 2021, 46(1): 46
- [5] RHINEHART T A, CHRONISTER L M, DEVLIN T, et al. Acoustic localization of terrestrial wildlife: current practices and future opportunities[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(13): 6794
- [6] MENNILL D J, BATTISTON M, WILSON D R, et al. Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for

- spatial monitoring of animal ecology and behaviour[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(4): 704
- [7] 王代平, 夏灿玮, 张丽君, 等. 野生动物声音定位系统模拟实验及精度分析[J]. *动物学杂志*, 2013, 48(5): 726
- [8] KRAKAUER A H, TYRRELL M, LEHMANN K, et al. Vocal and anatomical evidence for two-voiced sound production in the greater sage-grouse *Centrocercus urophasianus*[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(22): 3719
- [9] LIPPOLD S, FITZSIMMONS L P, FOOTE J R, et al. Post-contest behaviour in black-capped chickadees (*Poecile atricapillus*): loser displays, not victory displays, follow asymmetrical countersinging exchanges[J]. *Acta Ethologica*, 2008, 11(2): 67
- [10] FOOTE J R, FITZSIMMONS L P, MENNILL D J, et al. Male chickadees match neighbors interactively at dawn: support for the social dynamics hypothesis[J]. *Behavioral Ecology*, 2008, 19(6): 1192
- [11] MENNILL D J, VEHRENCAMP S L. Context-dependent functions of avian duets revealed by microphone-array recordings and multispeaker playback[J]. *Current Biology*, 2008, 18(17): 1314
- [12] JAKOBSEN L, OLSEN M N, SURLYKKE A. Dynamics of the echolocation beam during prey pursuit in aerial hawking bats[J]. *PNAS*, 2015, 112(26): 8118
- [13] LEWANZIK D, GOERLITZ H R. Continued source level reduction during attack in the low-amplitude bat *Barbastella barbastellus* prevents moth evasive flight[J]. *Functional Ecology*, 2018, 32(5): 1251
- [14] SPILLMANN B, WILLEMS E P, NOORDWIJK M A, et al. Confrontational assessment in the roving male promiscuity mating system of the Bornean orangutan[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2017, 71(1): 20
- [15] WILSON S J, BAYNE E M. Use of an acoustic location system to understand how presence of conspecifics and canopy cover influence ovenbird (*Seiurus aurocapilla*) space use near reclaimed wellsites in the boreal forest of Alberta[J]. *Avian Conservation and Ecology*, 2018, 13(2): 4
- [16] HENNIGAR B, ETHIER J P, WILSON D R. Experimental traffic noise attracts birds during the breeding season[J]. *Behavioral Ecology*, 2019, 30(6): 1591
- [17] KERSHENBAUM A, OWENS J L, WALLER S. Tracking cryptic animals using acoustic multilateration: a system for long-range wolf detection[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019, 145(3): 1619
- [18] 王勇, 李智君. 网络化测控设备间的时间同步[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(9): 1085
- [19] COLLIER T C, KIRSCHER A N G, TAYLOR C E. Acoustic localization of antbirds in a Mexican rainforest using a wireless sensor network[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128(1): 182
- [20] FROMMOLT K H, TAUCHERT K H. Applying bioacoustic methods for long-term monitoring of a nocturnal wetland bird[J]. *Ecological Informatics*, 2014, 21: 4
- [21] LAPIERRE J M, MENNILL D J, MACDOUGALL-SHACKLETON E A. Spatial and age-related variation in use of locally common song elements in dawn singing of song sparrows *Melospiza melodia*: old males sing the hits[J]. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 2011, 65(11): 2149
- [22] MØLLER A P. Up, up, and away: relative importance of horizontal and vertical escape from predators for survival and senescence[J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2010, 23(8): 1689
- [23] SCHWARTZ J J, HUNCE R, LENTINE B, et al. Calling site choice and its impact on call degradation and call attractiveness in the gray treefrog, *Hyla versicolor*[J]. *Behavioral Ecology & Sociobiology*, 2016, 70(1): 1
- [24] 王长利, 刘代志. 双曲线定位精度仿真分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2004, 24(3): 288
- [25] 郝燕玲, 邓志鑫, 赵国清. 双曲线与圆定位最优岸台分布算法研究与比较[J]. *中国航海*, 2008, 31(2): 95
- [26] DENG Z Q, LLOYD H, XIA C W, et al. Components of variation in female common cuckoo calls[J]. *Behavioural Processes*, 2019, 158: 106
- [27] XIA C W, WEI C T, LLOYD H, et al. Dawn singing intensity of the male brownish-flanked bush warbler: effects of territorial insertions and number of neighbors[J]. *Ethology*, 2014, 120(4): 324
- [28] ZHOU B, XIA C W, CHEN Z R, et al. Individual identification of male ural owls based on territorial calls[J]. *Journal of Raptor Research*, 2020, 54(1): 57
- [29] VARADHAN R, GILBERT P D. BB: An R Package for solving a large system of nonlinear equations and for optimizing a high-dimensional nonlinear objective function[J]. *Journal of Statistical Software*, 2009, 32(4): 1

## Accurate acoustic localization with two binaural recorders

TIAN Miao XIA Canwei<sup>†</sup>

(Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity and Ecological Engineering,  
College of Life Sciences, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Animal vocalization can be used to locate animal position, which is a low interference and noninvasive method in animal monitoring. This method for triangulating the position of wild animals has been established previously, but always involve expensive and cumbersome hardware, therefore limiting the widespread use of the method. Here an acoustic location system based on two dual-track recorders was used. The optimal distribution of microphones was obtained. When the midpoint of two baselines connecting two microphones from the same recorder coincides, the monitoring range reaches a maximum. The accuracy of acoustic location was also considered. To improve precision of acoustic localization, one should include the influence of ambient temperature on sound velocity, improve localization precision of microphones, reduce measurement error of time difference, increase distance between microphones from the same recorder, and avoid extension of baselines passing through animal activity area. Judging from the playback calls from *Passer cinnamomeus* and *Pardaliparus venustulus*, location accuracy could reach  $(0.806 \pm 0.259)$  m and  $(0.781 \pm 0.293)$  m respectively.

**Keywords** acoustic location system; error; hyperbolic positioning; monitor

【责任编辑: 武 佳】