

# 野生动物声音定位系统模拟实验及精度分析

王代平 夏灿玮 张丽君 刘佳瑀 刘博野 张雁云\*

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学院 北京 100875

**摘要:** 声音通讯是动物交流的重要手段。利用声音定位野生动物,可以降低对动物的干扰,并且不受光线和生境的限制。2013年4~5月,在河南董寨国家级自然保护区利用鸣禽的鸣唱录音,检验了利用声音定位的精度。共选择4个样方,在样方的四个边角各放1台录音机,并在样方内随机选择播放点,播放雀形目鸟类的鸣唱。通过同一段声音到达不同录音机的时间差定位声源的位置,并与实际测量的位置相比较。结果得出5种鸣禽基于鸣声定位的平均精度为 $(1.89 \pm 0.99)$  m。本研究为该项技术在国内鸟类研究中的首次尝试,希望能为利用声音监测野生动物提供参考。

**关键词:** 声音定位系统; 监测; 鸣禽

中图分类号: Q958 文献标识码: A 文章编号: 0250-3263(2013)05-726-06

## A Simulation Experiment on Acoustic Location System of Wildlife and Its Accuracy Analysis

WANG Dai-Ping XIA Can-Wei ZHANG Li-Jun LIU Jia-Yu LIU Bo-Ye ZHANG Yan-Yun\*

*Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity and Ecological Engineering College of Life Sciences,*

*Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

**Abstract:** Acoustic signal is important on animal communion. Using vocalizations of animal to locate the position of individuals is a non-invasive method, and it is more feasible to monitor the wildlife that inhabit thick vegetation or mainly active at night. The possibility of acoustic location was tested in field with songs of passerine birds in this study. The field simulation experiment was conducted in the Dongzhai National Nature Reserve, Henan province during April and May in 2013. The experiment was conducted with 4 stereo recorders placed at the four corners of boundary of 4 square simulant territories of dense shrubs. The songs of 5 species of songbirds were played back at the sites that were selected randomly in the squares. With exploiting differences in sound arrival times at each recorder, we calculated the positions of acoustic sources, and compared them with the actual positions. The mean accuracy across five species was  $1.89 \pm 0.99$  m. We concluded that this system produced accurate location estimates based on multi-channel recordings of some types of acoustic signals. This study introduced a new technology and it might be useful to wildlife researchers.

**Key words:** Acoustic location system; Monitor; Songbirds

监测野生动物的活动位点是行为学研究的重要内容,领域动态的监测(Mennill et al. 2006, Osmun et al. 2011)、个体间的通讯交流(Foote et al. 2008)、可变样线数量调查(Baldo et al. 2011)均是基于确定野生动物活动位点的基础之上。在实际监测过程中,一些动物或

栖息于浓密的生境中,或夜间活动不易观察(Mennill et al. 2008)。目前对野生动物的准确

\* 通讯作者, E-mail: zhangyy@bnu.edu.cn;

第一作者介绍 王代平,男,硕士研究生;研究方向:动物生态学; E-mail: wangdaiping88@126.com。

收稿日期:2013-05-13,修回日期:2013-08-20

定位常需要借助遥测、自动相机等设备。遥测需要捕捉、标记动物,对动物干扰较大;而自动相机监测需要布设大量设备,且受限于动物活动的高度等因素(苗保河等 2011)。

声音是动物重要的通讯手段。声音信号具有传递范围远、受障碍物限制小的优点。对于夜行性和茂密生境中的动物,由于光线和障碍物导致视觉信号的传递受限,声音信号在通讯中的作用更为显著(Gill 2007)。使用多台录音装置(microphone array),可根据声音传递到不同录音装置的时间差,推算声源的位置,为监测野生动物的位置提供了可行性(McGregor et al. 1997, Blumstein et al. 2011)。

利用声音定位动物具有如下优点。首先,能精确定位野生动物的位置;其次,可降低对研究对象的干扰和伤害;第三,通过声音的个体性特征,可同时定位多个个体或者整个种群,研究个体之间的信号交流;第四,可对生存于浓密植被中或在夜间活动等不易直接观察的动物进行定位和监测(McGregor et al. 1997, Mennill et al. 2012)。

本文介绍利用声音定位的原理和方法,并开展了野外模拟实验,检验声音定位的精度,为利用声音定位监测野生动物提供参考。

## 1 研究方法

**1.1 声音定位的原理** 利用声音从声源到不同位置录音设备的时间差来确定声源的位置。如图 1 所示,声音从声源 O 传递到不同录音设

备的时间是不同的。计算不同录音设备(以 C、D 为例)记录到同一声音的时间差  $\Delta t_{CD}$ ,并乘以声速转换为声源到不同录音设备的距离差  $\Delta d_{CD}$ 。依据声源到录音设备 C、D 的距离差,可以将声源定位在双曲线 I:

$$(4y_1^2/S_1^2) - [4x_1^2/(S_1^2 - \Delta d_{CD}^2)] = 1$$

其中,  $x_1, y_1$  表示声源 O 的位置坐标(m),  $S_1$  表示录音设备 C、D 之间的距离(m),  $\Delta d_{CD}$  表示声源 O 到录音设备 C、D 之间的距离差(m)。

同样,依据声源到录音设备 B、D 的距离差,可以将声源定位在双曲线 II:

$$(4y_1^2/S_2^2) - [4x_1^2/(S_2^2 - \Delta d_{BD}^2)] = 1$$

其中,  $x_1, y_1$  表示声源 O 的位置坐标(m),  $S_2$  表示录音设备 B、D 之间的距离(m),  $\Delta d_{BD}$  表示声源 O 到录音设备 B、D 之间的距离差(m)。

双曲线的形状由录音设备间的距离和声源到这两个录音设备的距离差决定。联立双曲线方程 I、II,可求出声源的位置(即两条双曲线交点)。从声音定位的原理可见,定位的精度受到录音设备间的距离、测量声音的时间差及声速的共同影响。

实际应用中,如图 1 所示,声源位置(O')的高度可能与录音设备悬挂高度不一致,高度差为  $\Delta h$ ,则  $\Delta d'_{CD} = S_{O'C} - S_{O'D}$ ,其中  $S_{O'C}^2 = S_{OC}^2 + \Delta h^2$ ,  $S_{O'D}^2 = S_{OD}^2 + \Delta h^2$ ,  $\Delta d'_{CD}$  表示声源 O' 到录音机 C、D 的距离差(m),  $S_{OC}$  表示声源 O' 到录音设备 C 的距离(m),  $S_{OD}$  表示声源 O' 到录音设备 D 的距离(m),  $S_{OC}$  为声源 O' 与录音设备 C 的连线在平面上的投影距离,  $S_{OD}$  为声源

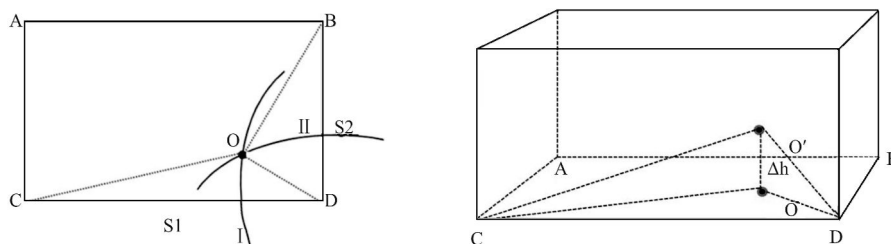


图 1 声音定位示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of acoustic location

O 为声源的位置; A、B、C、D 为录音设备; C、D 间距离为  $S_1$ , B、D 间距离为  $S_2$ 。

O is the site of source; A, B, C, D are recorders;  $S_1$  is the distance between C and D,  $S_2$  is the distance between B and D.

O'与录音设备 D 的连线在平面上的投影距离。Mennill 等(2006)研究指出录音设备悬挂高度对定位精度影响很小,因此可以忽略声源位置高度与录音设备高度的不同所带来的误差。

**1.2 研究地点** 野外实验于 2013 年 4~5 月在董寨国家级自然保护区进行(31°28'~32°09'N, 114°18'~114°30'E)。选取浓密灌丛生境实验样地 4 个,实验样地为边长约 40 m 的方形。样地内植物主要有油茶(*Camellia oleifera*)、小叶女贞(*Ligustrum quihoui*)、多腺悬钩子(*Rubus phoenicolasius*)、杜鹃(*Rhododendron simissi*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)等。将 4 台录音机分别置于样地四个角(参照图 1),悬挂高度约 1.5 m。在样地内随机选择 1 个播放位点播放鸣声。录音机之间的距离,以及播放点距离录音机的距离通过莱卡 D5 测距仪(Leica 公司,瑞士)测量。植被类型和密度可能对声音的传播具有影响,从而影响定位结果。Mennill 等(2006)在热带雨林中通过播放棕白苇鹪鹩(*Thryothorus rufalbus*)鸣声来检验声音定位系统的精度,发现热带森林植被对声音传播的影响引起的误差很小。本实验样地属于温带森林植被类型,相比于热带森林植被,植被类型和密度对定位结果的影响可以忽略。

**1.3 播放与录音** 每个实验样地内均选择了 5 种研究地常见鸟类(黄腹山雀 *Parus venustulus*、冠纹柳莺 *Phylloscopus reguloides*、黄喉鹀 *Emberiza elegans*、金翅雀 *Carduelis sinica*、山麻雀 *Passer rutilans*)的鸣唱作为播放声音(图 2)。所播放声音来自北京师范大学鸟类课题组。利用 Goldwave 5.25 声音处理软件(GOLDWAVE,加拿大)调节录音的速率为 10 s/句,采用 CEL-240 声级计(CASELLA,英国)调节音量至 80 dB(1 m 处测量),以模拟鸟类自发鸣唱时的速率和音量。播放设备采用 SME-AFS 音箱(Saul Mineroff Electronics 公司,美国)。播放的位置为随机选择的播放点。播放设备距地面约 1.5 m。共播放冠纹柳莺的鸣唱 8 句、黄腹山雀鸣唱 10 句、黄喉鹀鸣唱 10 句、

金翅雀鸣唱 5 句、山麻雀鸣唱 10 句。

录音设备采用 Songmeter (SM2) 录音机(Wildlife Acoustics 公司,美国),录音频率为 20~20 000 Hz。通过设置 SM2 录音机的启动时间,多台录音机可以对定位对象同时录音。但是每台 SM2 录音机自带的时钟可能存在误差,这对于声音定位的结果会产生影响。因此我们在确定的位置(该位置到每台录音机的距离已知)播放一段声音,通过比较该段声音到每台录音机的时间差,来消除 SM2 录音机自带时钟误差的影响。

**1.4 数据分析** 利用 Avisoft 声音分析软件(Avisoft Bioacoustics 德国)生成语图,并测量时间差。语图设置参数为:采样频率(sampling frequency) = 22.05 kHz,采样精度(sampling size) = 16 bit,快速傅里叶变换(FFT length) = 256 points,哈明窗口(Hamming window),帧长(frame size) = 100%,重叠(overlap) = 50%,频率分辨率(frequency resolution) = 86 Hz,时间分辨率(time resolution) = 5.8 s。分析语图时,在相应的四个录音语图中选取最清晰且相同的一点,得出其相应的时间点,进而得出声音到各台录音机的时间差( $\Delta t$ )。依据录音机间的距离,以及声音在各台录音机间的时间差计算声源的位置,并与测距仪实际测量的位置相比较。声源位置的计算利用 Matlab 数学软件(MathWorks 公司,美国)完成。文中数据呈现方式为平均值  $\pm$  标准差(Mean  $\pm$  SD)。

## 2 结果

通过声音定位确定的 4 个样地定位精度见表 1。5 种雀形目鸟类定位平均精度为(1.89  $\pm$  0.99)m。不同物种的定位精度有差异,山麻雀定位精度最高,为(1.01  $\pm$  0.33)m,其次金翅雀为(1.38  $\pm$  0.17)m,黄腹山雀为(1.70  $\pm$  0.89)m,冠纹柳莺为(1.92  $\pm$  0.91)m,黄喉鹀精度最低,为(3.46  $\pm$  3.15)m。

## 3 讨论

研究结果得出 5 种鸣禽定位平均精度为

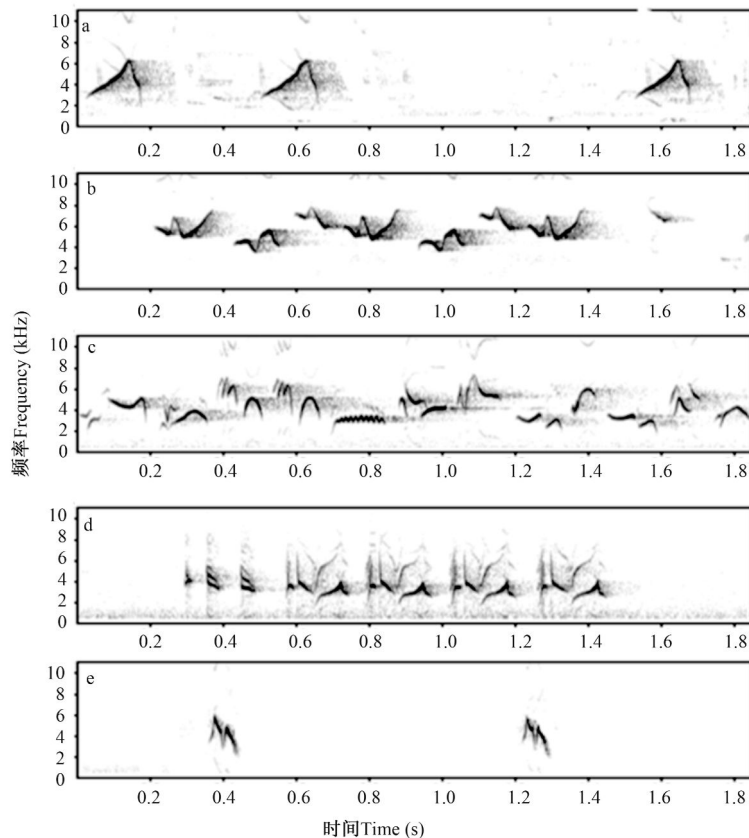


图2 播放使用的5种雀形目鸟类鸣声语图

Fig.2 The spectrum of 5 kinds of Passerine birds used in playback

a. 黄腹山雀; b. 冠纹柳莺; c. 黄喉鹀; d. 金翅雀; e. 山麻雀。

a. *Parus venustus*; b. *Phylloscopus reguloides*; c. *Emberiza elegans*; d. *Carduelis sinica*; e. *Passer rutilans*.

( $1.89 \pm 0.99$ ) m, 相比雀形目鸟类繁殖期活动范围, 在多数情况下可满足定位的要求 (Campbell et al. 2012)。利用声音定位的精确度受到多种因素的影响, 物种所发出的声音特征对其定位精度影响较大。鸣声的频率调节对定位精度有很大影响, 声音频率调节较大 (frequency modulated sounds, 单位时间内的频率变化幅度大) 的物种, 其定位精度比频率相对平稳 (constant frequency sounds) 的物种高 (McGregor et al. 1997)。本研究中, 5 种雀形目鸟类因其鸣声的不同, 其定位精度也有较大差异 (图2、表1), 由图2中声音语图可见, 山麻雀鸣声相对简单, 频率调节变化大 (在较短时间内频率陡然下降), 定位精度最高。黄喉鹀鸣声复杂 (单位时间内音节较多且连续), 每个

音节频率变化范围小, 因而定位精度最低。一般认为鸣声频率较宽的物种其定位精度较高, 如卡罗苇鹪鹩 (*Thryothorus ludovicianus*)、长尾娇鹩 (*Chiroxiphia linearis*)、横斑蚁鹀 (*Thamnophilus doliatus*)、灰树蛙 (*Hyla versicolor*) 鸣声具有较宽的频率范围, 定位精度均较高 (Mennill et al. 2012)。

录音机的放置密度对定位精度也有较大的影响。声音传播的越远, 传播过程中衰减越多, 声音定位的精度也越低 (McGregor et al. 1997)。定位精度在一定程度上与录音机放置的密度呈正比 (Mennill et al. 2012)。如条件许可, 增加录音机数量, 可扩大声音定位所覆盖范围和增强定位精度。如 Patricelli 等 (2010) 使用 24 台录音机来研究雄性艾草松鸡

表 1 4 个样地 5 种鸟类的定位误差 (m)  
Table 1 The location accuracy of 5 Passerine birds in 4 sites (m)

| 物种<br>Species                          | 样地 1<br>Site 1               | 样地 2<br>Site 2               | 样地 3<br>Site 3               | 样地 4<br>Site 4               |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 黄腹山雀<br><i>Parus venustulus</i>        | 1.50 ± 0.44<br>(1.06 ~ 2.24) | 0.72 ± 0.05<br>(0.64 ~ 0.75) | 1.59 ± 0.66<br>(1.18 ~ 2.73) | 3.01 ± 1.37<br>(0.95 ~ 4.73) |
| 冠纹柳莺<br><i>Phylloscopus reguloides</i> | 1.88 ± 1.85<br>(0.35 ~ 5.05) | 0.91 ± 0.28<br>(0.75 ~ 1.40) | 1.51 ± 0.85<br>(0.73 ~ 2.73) | 3.37 ± 2.18<br>(1.09 ~ 5.55) |
| 黄喉鹀<br><i>Emberiza elegans</i>         | 1.37 ± 0.94<br>(0.42 ~ 2.73) | 1.26 ± 0.55<br>(0.75 ~ 2.06) | 2.35 ± 0.70<br>(1.18 ~ 3.00) | 8.86 ± 0.47<br>(8.60 ~ 9.67) |
| 金翅雀<br><i>Carduelis sinica</i>         | 1.57 ± 0.59<br>(1.01 ~ 2.40) | 1.13 ± 0.70<br>(0.22 ~ 2.06) | 1.35 ± 0.61<br>(0.42 ~ 1.90) | 1.47 ± 0.96<br>(0.59 ~ 1.09) |
| 山麻雀<br><i>Passer rutilans</i>          | 0.93 ± 0.60<br>(0.42 ~ 1.87) | 0.57 ± 0.23<br>(0.22 ~ 0.75) | 1.50 ± 0.75<br>(0.73 ~ 2.73) | 1.03 ± 0.50<br>(0.49 ~ 1.83) |

表中括号内数据为定位误差的范围:最小值~最大值。

The data in parentheses is the range of the accuracy: min. - max.

(*Centrocerus urophasianus*) 在求偶场的活动,其监测范围达 100 m × 130 m。Foote 等 (2008) 使用 16 台录音机监测黑顶山雀 (*Parus atricapillus*) 在繁殖季节的领域动态,总监测面积可达 160 000 m<sup>2</sup>。本研究为尝试性实验,在选定的位点播放录音,4 台录音机即可满足要求。在实际应用中,研究者可以根据研究对象的的活动范围和录音设备的成本,来综合考虑实验设计方案。

不同的生境对声音定位的精度也有影响。在森林或者浓密灌丛等生境中,受声音的衰减、衍射等因素影响,定位精度会降低。McGregor 等 (1997) 研究表明,相比于草地生境,在森林的定位精度较低。本研究中,选取的 4 个样地均为典型的灌丛栖息地,生境基本一致。

除上述因素对声音进行定位精度的影响,该方法还有如下局限性。第一,研究者必须了解研究对象的鸣声特征,避免其他物种所发出的声音对研究结果的干扰 (Blumstein et al. 2011)。其次,对于一些领域较大的物种,由于录音设备的性能和声音衰减的影响,定位精度较低 (Campbell et al. 2012)。

目前,利用声音定位已被应用于监测动物的领域 (Kirschel et al. 2011)、研究动物间的交流 (Foote et al. 2008)、研究动物的对唱行为 (Fitzsimmons et al. 2008)、验证动物的交流方式 (Patricelli et al. 2007)。在实际应用中,研究者

要首先确定研究对象经常活动的位置以及领域大小,然后在其领域边界布置录音装置,录音机数量可根据领域大小和研究目标来确定。如 Campbell 等 (2012) 利用声音定位来调查鸟类数量和研究鸟类行为,在每一个半径为 50 m 的研究样地布置了 8 台录音机,其中 7 台位于样地边界 (相隔 43.4 m),1 台位于样地中央。同时,还要考虑测距、植被等带来的影响,确保定位精准。

利用声音定位野生动物,适用于能发出声音的哺乳类、鸟类、两栖类等动物类群,该方法为动物行为和生态研究提供了新的的技术方法,具有广泛的应用前景 (Mennill et al. 2011)。  
致谢 感谢北京师范大学闫凯博士在数据处理中的帮助。

## 参 考 文 献

- Baldo S, Mennill D J. 2011. Vocal behavior of great curassows, a vulnerable neotropical bird. *Journal of Field Ornithology*, 82 (3): 249 - 258.
- Blumstein D T, Mennill D J, Clemens P, et al. 2011. Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48 (3): 758 - 767.
- Campbell M, Francis C M. 2012. Using microphone arrays to examine effects of observers on birds during point count surveys. *Journal of Field Ornithology*, 83 (4): 391 - 402.
- Fitzsimmons L P, Foote J R, Ratcliffe L M, et al. 2008. Eavesdropping and communication networks revealed through

- playback and an acoustic location system. *Behavioral Ecology*, 19(4): 824 – 829.
- Foote J R, Fitzsimmons L P, Mennill D J, et al. 2008. Male chickadees match neighbors interactively at dawn: support for the social dynamics hypothesis. *Behavioral Ecology*, 19(6): 1192 – 1199.
- Gill F B. 2007. *Ornithology*. 3rd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 215 – 242.
- Kirschel A N G, Cody M L, Harlow Z T, et al. 2011. Territorial dynamics of Mexican Ant-thrushes *Formicarius moniliger* revealed by individual recognition of their songs. *Ibis*, 153(2): 255 – 268.
- McGregor P K, Dabelsteen T, Clark C W, et al. 1997. Accuracy of a passive acoustic location system: empirical studies in terrestrial habitats. *Ethology Ecology and Evolution*, 9(3): 269 – 286.
- Mennill D J. 2011. Individual distinctiveness in avian vocalizations and the spatial monitoring of behaviour. *Ibis*, 153(2): 235 – 238.
- Mennill D J, Burt J M, Fristrup K M, et al. 2006. Accuracy of an acoustic location system for monitoring the position of duetting songbirds in tropical forest. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5): 2832 – 2839.
- Mennill D J, Matthew B, David R W, et al. 2012. Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for spatial monitoring of animal ecology and behaviour. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(4): 704 – 712.
- Mennill D J, Vehrencamp S L. 2008. Context-dependent functions of *Avian* duets revealed by microphone-array recordings and multispeaker playback. *Current Biology*, 18(17): 1314 – 1319.
- Osmun A E, Mennill D J. 2011. Acoustic monitoring reveals congruent patterns of territorial singing behaviour in male and female tropical wrens. *Ethology*, 117(15): 385 – 394.
- Patricelli G L, Dantzker M S, Bradbury J W. 2007. Differences in acoustic directionality among vocalizations of the male red-winged blackbird (*Agelaius phoeniceus*) are related to function in communication. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 61(7): 1099 – 1110.
- Paricelli G L, Krakauer A H. 2010. Tactical allocation of effort among multiple signals in sage grouse: an experiment with a robotic female. *Behavioral Ecology*, 21(1): 97 – 106.
- 苗保河, 张文波, 杨科, 等. 2011. 利用红外感应自动照相机对北京市王平矿区鸟兽的快速调查. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 47(3): 289 – 291.