

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104052

机动车鸣笛抓拍系统校准技术研究*

戴金洲¹ 牛 锋² 沙 硕¹ 邬 洋¹

(1.北京市计量检测科学研究院 北京 100029;2.中国计量科学研究院 北京 100029)

摘 要:机动车鸣笛抓拍系统是近年来交通管理部门在智能交通领域的一项创新性的应用。该系统中的声源定位单元通过传声器阵列技术实时捕捉机动车违法鸣笛信号并实时定位违法鸣笛车辆,首先通过对声源定位的算法仿真,验证了传声器阵列技术应用于机动车鸣笛抓拍系统的可行性,同时指出了鸣笛抓拍系统校准的重要性。接着,提出了一种机动车鸣笛抓拍系统的校准方法,即包括消声室检测和现场道路检测校准;在消声室检测校准环节,检测了传声器阵列对声源的定位精度;在现场道路检测校准环节,设备安装在实际道路使用环境中,检测机动车鸣笛抓拍系统对鸣笛行为进行抓拍的有效率、捕获率和误报率。最后根据校准方法对机动车鸣笛抓拍系统进行消声室内定位和现场道路定位实验,结果表明该校准方法的有效性。

关键词: 计量学;传声器阵列;声源定位;机动车鸣笛抓拍

中图分类号: TN52⁺8;TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Study on the calibration technology for the vehicle honking detection system

Dai Jinzhou¹ Niu Feng² Sha Shuo¹ Wu Yang¹

(1. Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: The vehicle honking detection system is an innovative application of traffic management department in the field of intelligent transportation in recent years. The sound source location unit can capture the illegal honking signal of vehicle and locate the vehicle honking source by microphone array technology. In this paper, the feasibility of microphone array technology applied to the vehicle honking detection system is verified by simulation of sound localization algorithm, where we clearly point out the importance of calibration of vehicle honking detection system. Then, two calibration methods of vehicle honking detection system are studied, which include anechoic chamber testing and field testing. The validation in anechoic chamber mainly measures the location accuracy of microphone array to the sound source, while, the field testing is designed to measure the accuracy rate, the capture rate and the false alarm rate under different working conditions. According to the validation method, an experiment has been done and the results show the validity of this calibration technology in the application of vehicle honking detection system.

Keywords: metrology; microphone array; sound localization; vehicle honking detection system

0 引 言

机动车鸣笛抓拍系统是近年来新出现新型非现场执法监控装置,是当前交通管理部门治理机动车违规鸣喇叭现象的主要执法器具,其通过声源定位手段在监测区域内对违规乱鸣喇叭的机动车定位并保留其影像信息。机动车鸣笛抓拍系统通常由声源定位单元、图像与

视频采集单元和信号处理单元组成^[1]。

为了实现全天候的违法乱鸣喇叭抓拍,机动车鸣笛抓拍系统一般包括高清摄像头、传声器阵列、补光灯以及主机等模块,其中高清摄像头用于获取图像和视频信息,传声器阵列用于实现违法鸣笛声音记录和鸣笛定位,补光灯用于实现夜间抓拍,主机用于完成信号处理功能^[2]。在机动车鸣笛抓拍系统中,声源定位单元利用传声器阵列技术,实时定位鸣笛位置。当检测到鸣笛行为发生时,

立即生成声学定位图像并通知信号处理单元从图像与视频采集单元获得当前违法鸣笛车辆的高清相机抓拍图像和视频信息,声学定位图像在光学图像上通过技术处理形成一张完整的鸣笛抓拍图像。同时,声源定位单元将鸣笛声的声源位置告知信号处理单元,信号处理单元则根据该位置从高清相机抓拍的图像中提取鸣笛车辆车牌号码、车牌颜色、车牌类型、车辆特征等信息,生成鸣笛车辆违法行为的取证信息,包括违法行为的视频及符合处罚证据要求的图片信息,将这些信息提交至后台管理控制单元。后台控制管理单元与交警执法系统联动,将违法鸣笛车辆鸣笛行为证据(图像及视频)上传到交警执法系统,在现场通过电子显示屏实时显示违法车辆号牌,或推送至执法人员的手机等移动端设备。

机动车鸣笛抓拍系统所处的工作环境是十分复杂的,不仅有刹车声、引擎声、胎噪声这些车辆本身所产生的噪声,还会有雨声、鸟鸣等环境干扰声。因此要求机动车鸣笛抓拍系统对上述噪声具有很强的抗干扰能力,以避免错误的抓拍现象发生^[2]。研究表明,影响定位性能的因素不仅仅是噪声,传声器阵列校准精度对定位也有着十分重要的影响,这是由于鸣笛定位的最远距离一般可达 50 m,微小的校准误差都可能导致定位的较大误差。

为了传声器阵列定位性能,一般需要对传声器阵列进行校准,目前大多采用已知校准声源位置的方法对其进行校准。采用的方法包括利用声源的到达方向(direction of arrival, DOA)进行校准^[3]、以及最大似然法进行校准等^[4]。本文提出了一种可应用于机动车鸣笛抓拍系统的校准方法,通过消声室检测和现场道路检测两个步骤,分别对传声器阵列的声学特性和抓拍性能进行校准,从而提高了机动车鸣笛抓拍系统的定位性能。

1 传声器阵列声学性能分析

机动车鸣笛抓拍系统中,声源定位单元对机动车违法鸣笛抓拍的捕获率和有效率具有核心作用。同时,这也是传声器阵列技术在智能交通领域的首次应用,故对其声学性能做进一步的讨论^[5]。本文采用目前市场上常见产品所采用的传统波束成形^[6](beamforming)算法(延迟求和)为讨论基础。

在传声器阵列技术中,不同的阵型具有不同的阵列模式,会对定位结果产生不同的影响^[7]。在机动车鸣笛声定位这一具体应用场景中,主要考虑定位精度和旁瓣抑制比^[8-9]。定位精度表现为当车辆鸣笛时,能否准确定位到鸣笛车辆^[10]。旁瓣抑制比表现为当车辆鸣笛时,附近其他噪声是否影响鸣笛定位结果^[11]。

的表现,各阵型的传声器分布如图 1 所示。

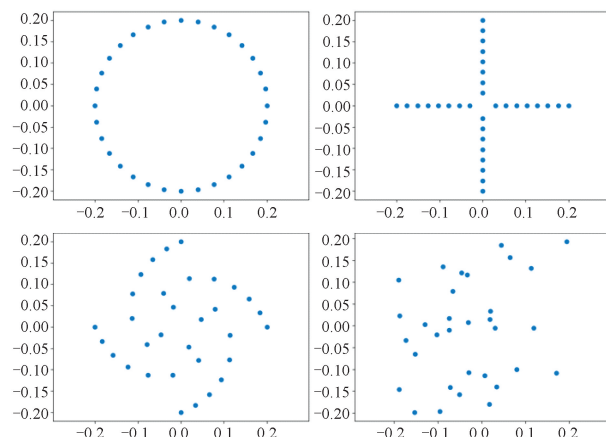


图 1 传声器阵列阵型

Fig. 1 Microphone array distribution

仿真单一声源的定位情况,对应于实际情况中单车鸣笛具有较高信噪比的情况。假定声源为白噪声,其所在位置为(0,0)。声源距离传声器阵列 25 m,扫描的网格范围为 16 m×16 m,可覆盖 4 车道的宽度范围。定位频率范围是以 4 000 Hz 为中心的 1/3 倍频程区间。采用传统的波束形成方法对声源进行定位,其定位结果如图 2 所示。从仿真结果可以发现,每种阵型均可以准确地定位声源位置,定位结果为(0,0)。但是,不同阵型定位结果的声成像结果是不同的。具体来说,环形阵的主瓣最小,但“旁瓣”距离主瓣较近;十字阵的主瓣较大,“旁瓣”沿着传声器布置的方向延伸,且具有较大的幅值;螺旋阵则较好地抑制“旁瓣”的影响,但是其主瓣宽度略大于环形阵;随机阵若经过合理的设计,可获得较小的主瓣宽度和较低的旁瓣水平^[12-13]。

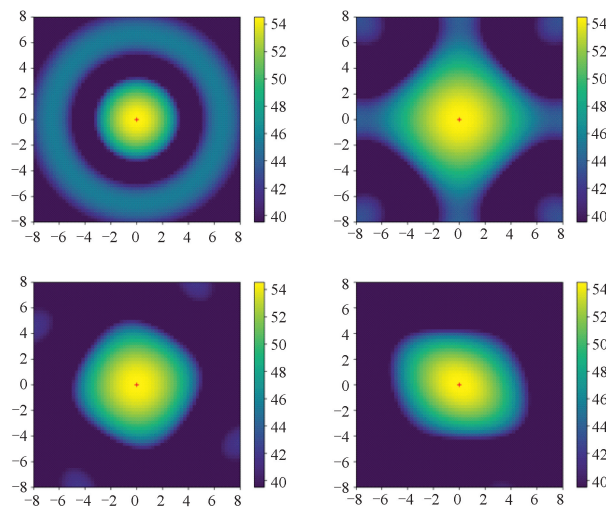


图 2 声源定位结果

Fig. 2 Sound localization results by conventional beamforming

仿真环形阵、十字阵、螺旋阵和随机阵在声源定位时

为了进一步研究多车鸣笛及单车鸣笛信噪比不足的声源定位情况,例如雨天鸣笛受胎噪的影响,在指定声源附近添加两个独立干扰声源。干扰声源的位置为(2, 0)和(0, 2),幅值相较于(0, 0)声源为-6 dB。仿真结果如图 3 所示。从仿真结果可以发现,每种阵型均受到干扰信号的影响,定位结果均为(0.25, 0.25)。考虑到实际车辆宽度约 1.8 m,在该仿真条件下不会致使系统抓拍到错误的车辆。但是,若信噪比进一步下降,则会进一步导致定位结果出现更大的偏差,致使整个机动车鸣笛抓拍系统错误抓拍。

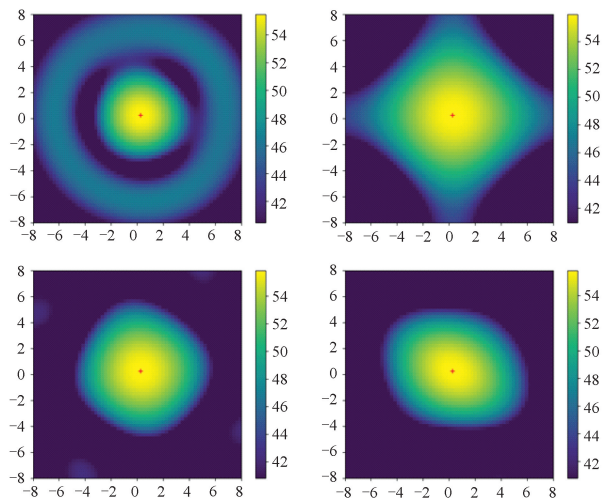


图 3 干扰情况下的声源定位结果

Fig. 3 Beamforming results with noise

为解决上述传统波束形成算法主瓣宽度较宽、受干扰声源影响的问题。在上述干扰声源的条件下使用螺旋阵搭配 DAMAS 算法^[14-15]和 Clean-SC 算法^[16-17]再次仿真,其仿真结果如图 4 所示。

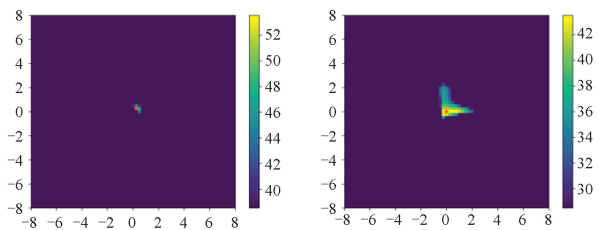


图 4 DAMAS 和 Clean-SC 声源定位结果

Fig. 4 Sound localization results by DAMAS and Clean-SC

从图 4 可知,采用 DAMAS 算法及 Clean-SC 算法都能有效地凸显声源的定位结果。其中, Clean-SC 的结果为(0.25, 0.25),和传统波束成形的结果一致。DAMAS 的定位结果为(0, 0),正确地定位出了声源的位置。然而 DAMAS 算法需要消耗巨大的计算资源,采用 Acoular 开源库,网格密度为 40×40, 32 通道的传声器阵列在主频

为 2.8 GHz 的 CPU 上,迭代 200 次时需消耗 2 850 s 左右的时间。同样配置下 Clean-SC 的计算时间在 25 s 左右。而实际应用中一般要求鸣笛后 2 s 内能够将鸣笛车辆号牌显示于显示屏上。故,这些耗时算法的特点阻碍了其实际的应用。另外, Clean-SC 对于扫描网格外的干扰具有较差的抑制能力^[16],容易导致错误的定位结果。

综上所述,根据上述仿真结果可知,声源定位技术虽然在有干扰声源的情况下可能会出现定位误差,但误差通常比较小,应用于机动车鸣笛抓拍系统可行。对于信噪比较高的单车鸣笛情况,采用任意阵型都可以获得准确的定位结果,但当定位环境存在干扰声源,致使鸣笛信号信噪比降低时,螺旋阵和随机阵由于其较好的旁瓣抑制特性,具有更好的抗干扰性。另一方面,对于同一个阵型采用 DAMAS 算法能够有效提升传声器阵列的定位精度和抗干扰能力。DAMAS 算法计算量巨大^[18],在实际应用不能用于实时抓拍,但可以作为后处理验证技术手段。在环境复杂并需要对鸣笛抓拍证据进行复议时,可以使用 DAMAS 算法进行二次分析,确保鸣笛抓拍系统的抓拍准确性。

上述仿真都是理想场景,即假定所有传声器幅频响应和相频响应完全一致且传声器阵列的位置精确已知。在实际应用中,传声器特性以及传声器阵列位置偏差都会造成声源定位性能的下降,因而需要对传声器阵列进行校准^[19]。

2 机动车鸣笛抓拍系统校准方法

本章讨论的机动车鸣笛抓拍系统的校准分为消声室检测和外场检测校准。消声室检测利用消声室提供的自由场环境,重点检测鸣笛抓拍系统的声学特性^[20]。外场检测则重点检测系统的功能和抓拍有效率、捕获率及误报率等系统综合应用性能指标。

2.1 消声室环境中定位精度校准

在消声室中对鸣笛抓拍系统中的声源定位单元的定位精度进行校准。使用点声源作为被测声源,鸣笛抓拍系统声源定位单元输出的声源坐标与实际声源坐标之间的距离差定义为定位精度。

消声室中机动车鸣笛抓拍系统的检测系统如图 5 所示。标准声源固定在运动模组中,运动模组如图 6 所示。通过该运动模组,可自由设定标准声源的 X、Y 坐标。由于消声室尺寸有限,故在标准声源正前方 1 m 处布置待测试的声源定位单元。设定信号发生器发出正弦信号的频率 f_i (频率范围为 3~5 kHz,通常取 4 kHz)。调节信号发生器输出电压幅值使得标准声源发出的声压级比背景噪声高 20 dB 以上。

设定标准声源的坐标为 (x_{li}, y_{li}) , 声源定位单元定

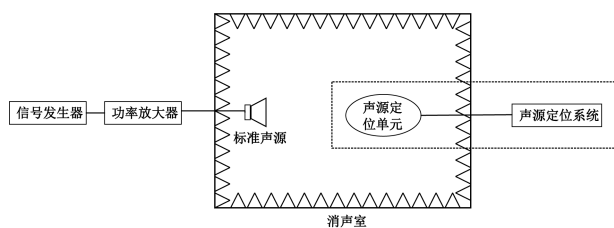


图 5 声源定位单元检测系统

Fig. 5 Detection system for sound localization unit



图 6 运动模组实物图

Fig. 6 Motion control system

位出的坐标为 (x_{2i}, y_{2i}) , 式(1)定义了频点 f_i 下声源定位系统的定位精度 M_i 。

$$M_i = \sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2} \quad (1)$$

多次移动标准声源的位置, 使其覆盖待检测声源定位单元的探测范围。记录每一次的定位精度 M_i 。同时应记录声源定位单元的探测范围和被测声源的频率。

2.2 现场性能指标校准和功能确认

因为道路实际工况复杂干扰信号多所以对鸣笛抓拍系统定位抓拍功能等检测也非常重要, 经消声室检测过的传声器阵列单元和图像与视频采集单元共同安装在现场道路上组成机动车鸣笛抓拍系统。

1) 检测试验路段设置

抓拍系统应安装于高约 6.5 m 的横杆上, 有效抓拍区域纵向应至少覆盖离声源定位单元路面垂直投影位置 15~35 m 区域, 横向覆盖 3 个车道。有效抓拍区域如图 7 所示, AA' 线为安装横杆的路面垂直投影线, BB' 线距离 AA' 线 15 m, CC' 线距离 AA' 线 45 m。以上常见试验道路的要求, 若现场条件无法满足上述要求, 则应根据实际情况减小抓拍有效区域。

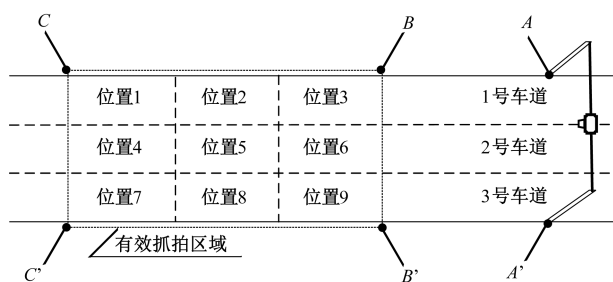


图 7 有效抓拍区域

Fig. 7 Monitoring area

2) 功能性检测

在有效抓拍区域内任意选择一个位置, 试验车辆 1~2 s 内连续鸣笛 3 次, 抓拍系统应自动抓拍生成有效的声成像图和声成像视频。回放声成像视频, 视频上应叠加正确的声成像图, 声成像图的显示和声音同步, 可清晰判定出 3 次鸣笛声来自试验车辆。

3) 捕获率、有效率和误报率

捕获率、有效率和误报率是机动车鸣笛抓拍系统的 3 个最主要的性能指标, 能够反映机动车鸣笛抓拍系统的计量性能。捕获率反映了机动车鸣笛抓拍系统对抓拍区域内违法鸣笛行为的检测能力。捕获率越高越好, 也就是应尽量做到“不漏”。如果捕获率太低, 大部分鸣笛行为都不被抓拍, 则失去了安装鸣笛抓拍系统的意义。

对捕获率、有效率和误报率进行校准时, 为尽可能真实地反映机动车鸣笛抓拍系统的真实抓拍情况, 选取覆盖有效抓拍区域内各个车道远、中、近不同距离的位置作为试验车鸣笛位置, 试验车在各个位置上以静止或行驶状态下鸣笛, 总鸣笛次数不少于 100 次。检验时间可根据实际情况, 选择在日间或者夜间。若系统成功抓拍并自动生成抓拍图片和视频的, 且车牌号识别正确的为有效抓拍。若系统抓拍成功, 但生成图片或视频出错以及车牌识别错误, 则认为是一次无效抓拍。若系统没有抓拍, 则判定该次检验鸣笛为漏检。

为避免实际系统工作中误判的行为, 设定以下 3 种误报检验场景下的检验, 检验鸣笛总次数至少为 60 次, 汇总 3 种误报检验场景下检验得到的鸣笛误报记录总数为 F 。(1) 在有效抓拍区域内, 两辆试验车并排分别停放在相邻车道的中间位置, 对其中一辆试验车(A 车)车牌进行人为遮挡。另一辆试验车(B 车)车牌保持正常状态。B 车不鸣笛, A 车鸣笛 20 次, 每两次鸣笛之间时间间隔不小于 4 s。如果抓拍系统自动生成 B 车的抓拍记录, 则该记录为鸣笛误报记录。(2) 在有效抓拍区域内, 两辆试验车前后停放在同一车道, B 车在前, A 车在后, 调整前后车距离直至 A 车车牌在图像采集单元图片中不可见, 且两辆车全部在有效抓拍区域内。B 车不鸣笛, A

车鸣笛 20 次,每两次鸣笛之间时间间隔不小于 4 s,如果抓拍系统自动生成前车的抓拍记录,则该记录为鸣笛误报记录。(3)在有效抓拍区域外,停放一辆试验车(A 车),在有效抓拍区域内停放另一辆试验车(B 车)。B 车不鸣笛,A 车鸣笛 20 次,每两次鸣笛之间时间间隔不小于 4 s。如果抓拍系统自动生成 B 车的抓拍记录,则该记录为鸣笛误报记录

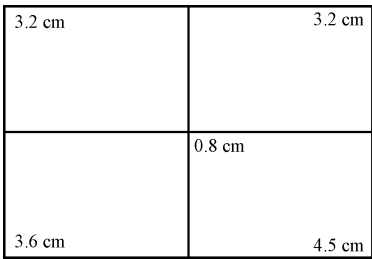


图 8 半消声室检测结果

Fig. 8 Semi-anechoic chamber test results

捕获率、有效率和误报率的计算公式如下:

$$\text{捕获率} = \frac{M}{N} \times 100\% \tag{2}$$
$$\text{有效率} = \frac{P}{N} \times 100\% \tag{3}$$
$$\text{误报率} = \frac{F}{W} \times 100\% \tag{4}$$

式中: M 为抓拍记录总次数; N 为在有效抓拍区域内实际鸣笛总次数; P 为有效鸣笛抓拍记录次数; F 为鸣笛误报记录次数; W 为误报检测场景下实际检验鸣笛总次数。

4) 行驶状态下检测
行驶状态下的检测主要确认在鸣笛车辆移动情况下,鸣笛抓拍系统是否能够形成有效抓拍记录。

装有标准测速仪的试验车匀速通过有效抓拍区域,分别以该路段限速值的 100%、50% 左右通过有效抓拍区域的每个车道并鸣笛一次。要求抓拍系统均能正确抓拍,声成像图和声成像视频均能正确反映鸣笛情况。

设置,设置情况如图 9 所示。然后针对功能性检测、捕获率、有效率、误报率和行驶状态的功能进行逐项测试。需要说明的是,现场未安装车辆测速设备且无法进行封路测试,故行驶状态下仅测试约 60 km/h 的工况。



图 9 现场测试布置

Fig. 9 On-road test layout

3 实验与结果分析

3.1 消声室环境中定位精度校准

为了验证本文所提校准方法的有效性,首先进行消声室内定位精度校准。传声器阵列固定于声源正前方 1 m 处,并设定传声器阵列中心为中心位置,依次移动声源至阵列有效探测范围内的左上 1 m、右上 1 m、左下 1 m、右下 1 m 和中心五个位置进行测试,每个位置分别测试 50 次并记录测试结果。声源发出 3.5 kHz 的单频信号。对声阵列对声源定位测量进行不确定度评估,中心位置扩展不确定度优于 0.3 cm, $k=2$,边缘位置扩展不确定度优于 1.1 cm, $k=2$ 。

检测结果如图 8 所示,中心位置误差 0.8 cm,左上及右上误差 3.2 cm,左下误差 3.6 cm,右下误差 4.5 cm。故认为导致其误差的主要原因分别是地面反射和运动模组的固定支架带来的散射。因此,传声器阵列定位误差的测试在全消声室内完成,并且运动模组需要进一步优化以减少对声波的散射,如使用更细的型材并在表面贴上吸声材料。

3.2 现场性能指标实验结果

按 2.2 节所述的现场测试要求对检测试验路段进行

功能性检测日间鸣笛 2 次;捕获率和有效率检测日间鸣笛 79 次,夜间鸣笛 88 次,共计 167 次。误报率检测日间鸣笛 38 次,夜间鸣笛 24 次,共计 62 次。行驶状态检测日间鸣笛 21 次,夜间鸣笛 12 次,共计 33 次。测试结果如表 1 所示。

表 1 现场性能指标测试结果
Table 1 Results of on-site road test

序号	测试项目	测试结果	实验次数
1	功能测试	符合	2
2	捕获	165	167
3	有效	162	167
4	误报	0	62
5	行驶状态	符合	33

从实验结果可知,机动车鸣笛现场性能指标实验能够较为完整的反映鸣笛抓拍系统的性能。其中功能测试项目可表明鸣笛抓拍系统具备正确抓拍鸣笛车辆并形成有效的处罚依据能力。捕获率、有效率综合反映了鸣笛抓拍系统的抓拍能力。误报率反映了鸣笛抓拍系统对画面外鸣笛的抗干扰能力。

然而,现场性能指标测试仍有如下不足:1)实际道路环境中干扰是随机且多样,目前设定的现场性能指标并未包含该测试项,在后续的工作中可模拟道路中的常见

干扰对抓拍结果的影响;2) 现场性能指标测试虽可以综合反映鸣笛抓拍系统的性能,但并不能在现场定量反映鸣笛抓拍系统的定位精度。在后续工作中可重点设计现场定位精度的测试方法以定量反映鸣笛抓拍系统的定位性能。

4 结 论

本文通过仿真验证传声器阵列技术应用于机动车鸣笛抓拍的可行性。针对该系统的工作原理,提出将机动车鸣笛抓拍系统的检测分为消声室检测和现场检测两部分。在消声室内检测传声器阵列的声学定位特性;在道路现场检测鸣笛抓拍系统在实际工况下的捕获率、有效率和误报率,并针对每一种工况提出对应的检测方法。分别在消声室内和道路现场对机动车鸣笛抓拍系统进行实验,消声室内检测证明鸣笛抓拍系统不同位置定位精度最大为4.5 cm,现场检测捕获率、抓拍率大于95%,误拍率为0%,结果表明该校准方法是可行的。

参考文献

- [1] T/SCJA 2-2019 机动车鸣笛抓拍系统[S]. 2019.
T/SCJA 2-2019 Vehicle honking detection system[S]. 2019.
- [2] 杜磊,孙桥,林峰,等. 基于真是交通状况的固定式机动车现场测速标准装置[J]. 计量学报,2018,39(2): 207-212.
DU L, SUN Q, LIN F, et al. Fixed standard instrument for field tests of vehicle speed measuring devices based on actual traffic [J]. Acta Metrologica Sinica, 2018, 39(2): 207-212.
- [3] JACOB F, SCHMALENSTROEER J, HAEB-UMBACH R. DOA-based microphone array position self-calibration using circular statistics [C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Process, 2013:116-120.
- [4] ZHENG Z, CHEN W, SEMPRUN K A, et al. Design and evaluation of a prototype system for real-time monitoring of vehicle honking [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3257-3267.
- [5] 孙建宏,张涛,焦琛. 麦克风数量与振兴对声源定位性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(11): 14-21.
SUN J H, ZHANG T, JIAO CH. Influence of array and the number of microphones on the localization performance of sound source [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (11): 14-21.
- [6] EHRENBERG L, GANNOT S, LESHEM A, et al. Sensitivity analysis of MVDR and MPDR beamformers [C]. 2010 IEEE 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 2010: 000416-000420.
- [7] SCHRÖDER R, JAECKEL O. Evaluation of beamforming systems[C]. 4th Berlin Beamforming Conference, eBeC-2012-26, 2012.
- [8] XENAKI A, JACOBSEN F, FERNANDEZ G. Improving the resolution of three-dimensional acoustic imaging with planar phased arrays [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(8): 1939-1950.
- [9] WANG T, CHOY Y. An approach for sound sources localization and characterization using array of microphones [C]. International Conference on Noise & Fluctuations, IEEE, 2015: 1-4.
- [10] KIM J, YOU B. Fault detection in a microphone array by intercorrelation of features in voice activity detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2568-2571.
- [11] 褚志刚,杨洋. 基于波束形成缩放声强的声源局部声功率计算[J]. 声学学报, 2013, 38(3): 265-271.
CHU ZH G, YANG Y. Calculation of the partial area sound power based on the scaled beamforming sound intensity [J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 265-271.
- [12] MALGOEZAR A, SNELLEN M, SIJTSMA P, et al. Improving beamforming by optimization of acoustic array microphone positions [C]. 6th Berlin Beamforming Conference, BeBeC-2016-S5, 2016.
- [13] SARRADJ E. A generic approach to synthesize optimal array microphone arrangements [C]. 6th Berlin Beamforming Conference, BeBeC-2016-S4, 2016.
- [14] POPPER A N, FAY R R, SIMMONS A M. Sound source localization [J]. Springer Handbook of Auditory Research, 2013, 3 (6): 3505.
- [15] BI C X, LI Y C, ZHANG Y B, et al. Signal reconstruction of moving sound sources with a fixed microphone array [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118(8): 277-289.
- [16] ZHUANG J, YE Q, TAN Q S, et al. Low-complexity variable loading for robust adaptive beamforming [J]. Electronics Letters, 2016, 52(5): 338-340.
- [17] SIJTSMA P, MERINO M R, MALGOEZAR A, et al. High-resolution CLEAN-SC theory and experimental validation[R]. AIAA Paper, 2017.
- [18] SHARMA R, COHEN I, BENESTY J. Adaptive and hybrid kronecker product beamforming for far-field speech signals [J]. Speech Communication, 2019, 120: 42-52.
- [19] MERINO M R, SIJTSMA P, SNELLEN M, et al. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays [J]. CEAS Aeronautical Journal,

2019, 10(1): 197-230.

- [20] JJF1492-2014 声源识别定位系统(波束形成法)校准规范[S]. 2014.

JJF1492-2014 Calibration Specification for Sound Source Identification and Localization Systems (Beamforming Method)[S]. 2014.

作者简介



戴金洲, 2007 年于中北大学获得硕士学位, 现为北京市计量检测科学研究院高级工程师, 主要研究方向智能交通设备测量和计量。

E-mail: daijz@bjil.cn

Dai Jinzhou received M. Se. from the

North University of China in 2007. He is currently a senior engineer at Beijing Institute of Metrology. His main research interests include intelligent transportation equipment measurement and metrology.



牛锋, 2006 年于南京大学获得硕士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为声学计量和声学测量技术和方法。

E-mail: niufeng@nim.ac.cn

Niu Feng received his M. Sc. degree from Nanjing University in 2006. Now he is an associate researcher at National Institute of Metrology. His main research interests include acoustical metrology and measurement.