

枪械枪声语谱特征识别的研究*

申小虎¹ 金恬² 张长珍¹ 万荣春¹

1. 江苏警官学院 2. 江苏省公安厅物证鉴定中心

摘要: 目的: 研究不同枪械射击枪声的语谱图特征, 找到利用提供的枪声样本对枪械类别进行分析的方法。方法: 分析研究枪械枪声产生的基本原理, 使用法庭语音分析系统OT-Expert 5.1对8类枪械80份实验样本的宽带语谱、LPC频谱、MFCC倒谱、信号能量谱进行分析比较并总结规律。结果: 实验结果发现相同枪械间各枪声在共振峰频率与过渡形态、基频参数、即时能量等具有较强的稳定性。不同枪械间上述语谱图参数特征存在一定的差异性。通过分析共振峰频率、基频参数、即时能量大小、音强曲线走势可对枪械枪管长度、口径、子弹初速度、枪膛密闭性以及标配弹头火药量进行判断并归类。结论: 除传统的枪痕检验方法外, 枪声的语谱图分析方法可成为区分枪械类别的辅助检验手段。

关键词: 枪械类别 语谱图分析 共振峰 基频 即时能量

任何枪击案件, 除利用现场遗留的各种枪械弹头、弹壳对其形状结构、尺寸大小和各种物证痕迹进行鉴定外, 覆盖案发现场的监控音视频也能够为破获案件、打击犯罪提供有价值的线索。例如通过对处于犯罪现场的不同位置的拾音器所录制枪声的数字音频材料进行分析, 可对枪声产生的地点进行有效定位^[1]; 利用短时能量和MFCC倒谱特征去除公共场所噪声可达到有效识别枪声的目的^[2-3]。

根据语音的同一认定的原理, 不同个体间声带、口腔鼻腔等共鸣腔构造的不同, 造成了相同个体间音节发音的稳定性和不同个体间的音节发音的差异性。不同类型枪械的枪管内壁构造、口径大小、子弹火药量也存在一定的差异性。因此通过语音频谱图和量化统计的方法对枪声音频进行分析, 找到不同枪械射击产生枪声图谱的差异性, 进而找到区分枪械的方法与规律存在理论可行性。本文在章节的编排上, 第一章对在枪声音频图谱及国内外研究现状进行了阐述; 第二章详细介绍了实验设备和样本采集的方法; 第三章通过实验对收集到的各类枪械产生的枪声样本, 利用法庭语音分析系统OT-Expert 5.1对其共振峰、基频、音强和短时能量进行分析论述; 最后一章总结利用语音图谱区分各类枪械枪声的经验与方法。

一、枪声的产生机理和语音图谱

枪械的分类方式很多, 按性能的不同可分为自动枪支、非自动枪支和转轮枪支; 按照用途的不同可分为军用枪支、警用枪支和民用枪支; 按照内壁结构不同可分为线膛枪和滑膛枪; 按照口径的不同可分为大口径枪支、中口径枪支和小口径枪支^[4]。除子弹的火药量不同外, 枪的声音主要取决于

几个因素: 一是枪管的长度; 二是枪管的壁厚; 三是枪膛结构的密封性。如图1所示, 枪声声源主要有两个: 一是枪管内的推进气体在到达枪口后迅速膨胀发出的爆炸声; 二是弹头以超音速飞行时与空气摩擦产生的超音速激波和音爆。



图1 枪械击发弹头射出瞬间的声波扩散形态

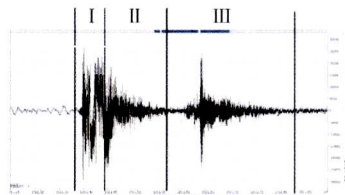


图2 54制式手枪射击枪声的时域波形图

图2为警用54式手枪射击产生枪声的时域波形图。枪声作为非语言信号, 在语音图谱上类似于语言信号中的塞音, 区域I为高压空气快速排出时瞬间的爆发期, 此时枪声音频能量最高, 波形图振幅最大。区域II为弹头射出后, 弹仓枪管等非密闭空间产生的残余气体逐渐排出, 弹头与空气摩擦产生的激波, 并随着弹头速度的降低并与拾音器的远离, 波形能量逐渐衰减的过程。此区域的声纹各特征效果较好, 是进行语音图谱特征分析的重要采集部分; 区域III为在密闭空间录制枪声过程中产生的回声。在实验过程中一般裁切此部分, 不作为枪声图谱的一部分。

*基金项目: 江苏省重点学科建设项目 (编号: 20110838); 江苏警官学院科研项目 (编号: 2016SJYZQ01); 江苏省教育厅资助项目 (编号: 2014SJB246)

二、实验条件

(一) 实验设备

硬件：Gnome-p专业录音器、研华科技610H工控机（CPU i7-4790 3.60G双核，内存16GB）。

软件：Adobe Audition语音编辑软件、STC降噪系统、俄罗斯法庭语音分析系统OT-Expert 5.1。

(二) 实验方法

采用Gnome-p录音设备进行枪声录音采集，利用Adobe Audition CS5.5软件对其进行剪辑，消除空白与回音音域，并归档建库。使用俄罗斯法庭语音分析系统OT-Expert 5.1对已采集枪声样本的共振峰曲线、基频参数、即时能量（音强）曲线等特性进行提取计算，选取几种特征效果显著的样本，分别讨论不同枪械射击枪声的规律性与差异性。

(三) 实验样本

根据枪械口径、枪管长度、枪膛结构的不同，选择国产警用制式54式、64式、77式、92式、05式警用转轮手枪、国产95式步枪、俄制AK74步枪、国产16号猎枪作为本实验所用采集枪声的击发枪械。实验采用各枪械的参数请参照表1。

表1 实验各枪械参数数据表

参数 枪种	枪管长(cm)	口径(mm)	装药量(g)	子弹初速(m/s)
54式手枪	116	7.62	0.43	420
64式手枪	86.5	7.62	0.4	300
77式手枪	86.5	7.62	0.4	310
92式手枪	111	7.62	0.34	350
05式转轮	75	9	0.34	220
95式步枪	463	5.8	1.6	930
16号猎枪	621	16.81	2.6	135
AK74	415	5.45	1.45	900

利用Gnome-P录音设备在射击馆或空旷靶场录制，根据司法部录音资料鉴定规范^[5]进行枪声录音，并录制上述8种枪械枪支的枪声。由于枪声信号受到音爆湍流的影响，声纹共振峰曲线与基频条纹没有普通语音信号那么明显，因此从录取构建的枪声数据库中选取强频区明显的枪声样本各10发次作为本次实验的样本。枪声样本的取样由于涉及到枪支的使用，部分枪械发声的场所只能限制在射击馆这样的封闭空间。但射击馆宽度远大于17m足以产生回声，因此需要对使用音频处理软件进行剪辑处理，以此提取枪械击发瞬间的声音，避免因录取条件的限制而产生的实验误差。

三、枪声图谱检验实验结果

从选取的8组80份枪声样本的实验结果对比中我们发

现，不同枪械在共振峰频率、基频各参数、即时能量值与走势上不尽相同，有时会出现明显的差异；而相同枪械在上述参数的差异性则不明显。具体如下：

(一) 不同枪械枪声的共振峰频率

分析相同枪械类枪声和不同枪械间枪声的宽带语谱图，分别统计其共振峰频率。由于枪声共振峰曲线条纹类同于塞音，没有普通元音共振峰曲线条纹明显，其共振峰走势分析的效果也是不清晰的。但塞音共振峰如果强频区明显，参照共振峰频率值进行分析也是可行的。为了区别共振峰频率的差异性，我们使用LPC频谱共得到80组共振峰曲线图。因篇幅有限，这里仅列出具有代表性的54制式手枪（图3上）与左轮手枪（图3下）的共振峰频率曲线对比图。从图3中可以看出，左轮手枪的第一共振峰频率明显高于54制式手枪。

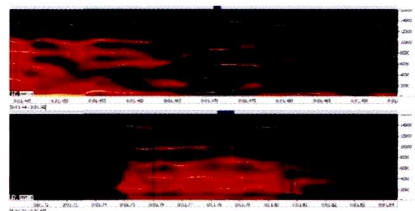


图3 不同枪械的LPC频谱的共振峰频率曲线图

为了更好的区分不同枪械枪声，需要将共振峰进行量化统计分析，本实验取枪声能量最高处到衰减为静默状态范围内的共振峰频率平均值。将54式不同枪次射击的枪声样本共振峰对比整理为表2；将口径相同但枪管长度不同的54式手枪与64式手枪的共振峰均值对比整理为表3；将口径、枪管长度均不同的54式手枪与转轮手枪的共振峰均值对比整理为表4。从统计结果中得到下列规律：相同枪械或口径、枪管长度均差别不大的枪械间产生枪声的各共振峰频率值差异率均小于同一认定所常采用的12%的变异系数阈值^[6]；第一

表2 54式手枪两次枪声样本的共振峰对比

	共振峰统计			相对偏差 %
	参数	枪声1	枪声2	
54式枪声 共振峰	F1	787	770	2.2
	F2	2771	2760	0.4
	F3	5968	5827	2.4
	F4	8679	8590	1.0
	F2/F1	3.52	3.58	1.7

表3 54式与64式手枪的共振峰均值对比

	共振峰统计			相对偏差 %
	参数	54式	64式	
共振峰 均值对比	F1	770	731	5.5
	F2	2760	3617	31.1
	F3	5827	5950	2.1
	F4	8590	7756	9.7
	F2/F1	3.58	4.95	38.2

表4 54式手枪与转轮手枪的共振峰均值对比

	共振峰统计			相对偏差 %
	参数	54式	转轮	
共振峰均值	F1	770	951	23.5
	F2	2760	3909	41.6
	F3	5827	5809	0.3
	F4	8590	8677	1.0
	F2/F1	3.58	4.11	14.8

共振峰频率随着枪声所属枪械的口径的增加而升高；第二共振峰随着枪声所属枪械的枪管长度的增加而降低。

(二) 不同枪械枪声的基频参数

利用OT-Expert的MFCC倒谱模块对80组枪声的基频参数进行统计分析。此处列出两组54式与92式（见表5）、54式与95自动步枪（见表6）、54式与16号猎枪（见表7）的枪声的基频各参数对比表。基频最小值与基频最大值分别是从倒谱上提取的数值中的最小及最大数值。其中基频最小值由于受外界环境干扰变化小，因此是基频参数中最有价值的参考数据。

对80组实验样本的基频数据进行统计分析，可以得到：各枪声的基频均值主要集中在60Hz~400Hz，且同共振峰频率的规律类似，即相同枪械枪声的基频相对偏差要比不同枪械间的差异更明显。同时与物体振动的原理所推测的结论相同，基频的均值与极值受子弹的初速度和口径影响较大，即枪弹出膛初速度越快、枪械口径越小，基频值越高；反之亦然。例如口径大、弹头初速低的16号猎枪枪声的基频值与口径小、弹头初速快的95式步枪枪声的基频值相对较低，区别明显。同时16号猎枪和95式步枪的口径与子弹初速度与警用54式手枪都有较大差别，反映在基频数据上也是各参数差异率也超过了语音同一认定时所采用的12%的变异系数。

表5 54式与92式手枪的基频各参数对比

基频参数	话者		相对偏差 %
	92式	54式	
基频平均数值,Hz	254	285	10.9
基频数值中值,Hz	210	238	11.8
基频RMS偏差,Hz	172.6	157.0	9.9
基频最大值(-3%), Hz	500	500	0.0
基频最小值(-3%), Hz	96	90	6.3
基频相对范围 (%)	5.2	5.6	7.7

表6 54式与95式步枪的基频各参数对比

基频参数	话者		相对偏差 %
	95步枪	54式	
基频平均数值,Hz	366	285	22.1
基频数值中值,Hz	331	238	28.1
基频RMS偏差,Hz	113.2	157.0	38.8
基频最大值(-3%), Hz	433	500	15.5
基频最小值(-3%), Hz	106	90	15.1
基频相对范围 (%)	4.1	5.6	36.6

表7 54式与16号猎枪的基频各参数对比

基频参数	话者		相对偏差 %
	54式	16号猎枪	
基频平均数值,Hz	285	58	79.6
基频数值中值,Hz	238	56	76.5
基频RMS偏差,Hz	157.0	9.2	94.1
基频最大值(-3%), Hz	500	64	87.2
基频最小值(-3%), Hz	90	49	15.1
基频相对范围 (%)	5.6	2.1	45.6

(三) 不同枪械枪声的即时能量（音强）

音强是语音的四要素之一，也是声纹鉴定中重要特征之一^[7]。枪声的音强分布比较复杂，本实验取枪声能量最高处的音强极值，并针对枪声即时能量按时间方向的动态分布情况进行了比较分析。

图4中从上至下分别是64式、77式、92式枪声的音强曲线图。可以看出，此3种枪械由于口径与弹药量参数近似，枪械枪声间的音强极值以及曲线走势也存在高度的相似性。

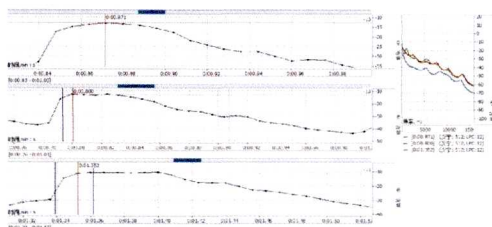


图4 64式、77式、92式枪声的音强曲线图

图5中从上至下分别是16号猎枪、AK74式、77式枪声的音强曲线图。音强曲线能量极值方面：子弹初速度越大，音强能量极值越大；枪械密闭性高的枪声能量小于枪械密闭性较差的枪械枪声。例如左轮手枪由于旋转弹仓和枪管之间有缝隙，会比其它枪械枪声的能量要强；音强曲线走势上：16号猎枪采用的球形弹丸初速较低，并且在飞行过程中迎风面积大，各弹丸运动姿态不稳定，方向不可靠，从而造成音强曲线主要特点是走势高低起伏无规律。步枪子弹由于初速度较高，子弹与空气摩擦过程其速度衰减较其他枪种慢，所以AK74与77式、猎枪枪声相比较，枪声音强曲线衰减速度较慢。



图5 16号猎枪、AK74步枪、77式枪声的音强曲线图

四、分析与讨论

每个共鸣系统具有一定频域中特有的共振峰和基频值,枪声的共振峰和基频大小同枪管的口径、长度、材料和厚度密切相关。但通过本次实验总结发现,口径和长度是共振峰和基频值变化的主要影响因素,因此本文仅讨论了例如口径、枪管长度、弹药火药量等起决定因素的枪械参数特征,未讨论枪械构造例如闭锁方式、空仓挂机等对语音图谱特征的影响。

普通语音在发声过程中,口腔、喉腔、舌位的变化造就了各音节多变的共振峰曲线,进而产生语义不同的语言。枪声共振峰频率的发音机理与语音音节发音机理相同,人声第一共振峰值主要依赖嘴唇的口型和舌位高低的变化,第二共振峰则主要反映了舌位前后的变化。将枪口类比为嘴唇、枪筒类比为口腔,并通过枪声的共振峰实验我们会总结出:其它参数相同情况下,利用第一共振峰F1的频率值可有效区分枪管的口径大小,即枪械的口径越大第一共振峰频率越高;利用第二共振峰F2的频率值可有效区分枪管的枪管长度,即枪管长度越长,第二共振峰值越小。但由于枪管构造的平滑与简单性,各枪声共振峰频率均有规律落在了基频倍频的附近。

枪声基频反映了枪弹与空气摩擦的振动速度,枪声基频的不同主要是由于在枪弹装药量和枪管长度的不同造成的。根据实验结果得出,基频的均值与极值与子弹的初速度和口径影响相关,而子弹的初速度与弹头的重量、装药量有关。因此我们可以利用基频各参数辨别枪械口径与弹头初速度,即枪声基频值越高,所属枪械标配弹头的初速度越快、枪管口径越小,进而可推测该枪械的标配弹种。

即时能量(音强)曲线的幅度与走势受子弹初速度和枪械间密闭性影响较大。影响子弹初速度的有诸多因素,例如弹头的载药量、口径、枪械间密闭性、枪管长度。一般来说,口径小、子弹装药量大的枪械射击的弹头初速度较快,音强能量幅度也较大。实际案例样本中采集设备的距离难以预估,且枪声音强曲线会随着采集距离的不同呈现较大的差异,因此仅分析某枪声能量图谱不能断定属于何类枪械。但针对案发现场多次枪声中,利用枪声能量曲线判断是否存在不同枪械射击具有一定的利用价值。

如果枪声在理想的空旷环境中传播过程中频率不会变化,但音强能量会随着与采集设备距离的增加而逐渐衰减。但实际环境下枪声在传播过程中会被墙壁、天花板、地板等障碍物反射吸收,反射后的枪声与枪声的原音叠加

在一起,形成混响的效果。射击环境的不同产生的混响声效果也不相同,射击环境不仅涉及空间大小,而且与射击位置周围的物品摆放,物体表面平滑度都有关系。同一枪支在不同的射击环境下不同混响效果能带来共振峰、基频与音强的不同变化。通常在声音叠加的时间点会产生音强能量的起伏,因此从音强曲线图中可以较容易的发现混响的痕迹。为避免混响对同一枪支在不同的射击环境下进行同一认定所带来的否定结论的影响,建议在实验组织阶段选取枪声样本中混响开始特定时间段之前的强频区域进行枪声特征识别研究。

五、结论与展望

以上表明,相同类型、枪械参数近似的枪声图谱在共振峰频率、基频参数、即时能量大小、音强曲线走势上与其他类型枪械相比较,枪声图谱存在一定的差异性。我们通过分析枪声图谱的上述特征值可以在一定范围内对枪械的口径、枪管长度、标配弹药载药量、子弹初速度等进行判断和描述。但由于枪声相比较普通人声语音,枪声图谱片段较短、受周边环境的影响,且参数相近的枪械种类多等原因,所以不能仅从枪声图谱各特征进行枪械类别的同一认定。

针对采集效果佳、声纹特征良好的枪声,通过进一步分析图谱特征可以成为枪弹痕迹检验手段的辅助证据信息,将在缩小侦查范围、减少嫌疑枪种上产生较好的利用价值。除最常用的枪弹痕迹、物屑之外,视听相关信息也可以为侦破持枪犯罪提供有力证据。

参考文献

- [1] 王宇. 枪声定位系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 刘鹏. 基于声谱图的公共场所异常声音特征提取及识别研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [3] 张智龙. 公共场所枪声特征提取及识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [4] 吕晓森. 枪弹痕迹检验技术规范[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2012.
- [5] SF/Z JD0301001-2010 司法部录音资料鉴定规范[S]. 北京: 司法鉴定管理局, 2010.
- [6] 崔效义, 李敬阳, 等. 中国刑事科学技术大全[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2002.
- [7] 王英利, 李敬阳, 曹洪林. 声纹鉴定技术综述[J]. 警察技术, 2012, 4: 54-56.