

doi:10.3969/j.issn.1007-855x.2010.03.022

中耳传输响应对声源定位的影响

郭天葵

(广东工业大学 实验教学部, 广东 广州 510006)

摘要: 以 M II 媒体实验室测得的 HRTF 实验数据为基础, 在不同的声源信号激励下, 双耳信号包括中耳传输响应和不包括中耳传输响应两种情况, 通过计算耳间互相关函数, 分别得到 IACC、双耳时间差和耳间互相关函数的宽度 W_{IACC} 等三个声学参数, 探讨了中耳传输响应对声源定位的影响. 结果表明, 中耳传输响应基本不影响声源方位角的定位, 但会对声源的明晰度产生影响, 而对声源明晰度影响的大小在一定程度上取决于声源信号的频谱.

关键词: 人耳听觉; HRTE; 声源定位

中图分类号: TU 112.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)03-0115-05

Middle Ear Transfer Response's Effect on Sound Source Localization

GUO Tian-kui

(Department of Experiment Teaching, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract Based on the HRTF database of M II media lab, in terms of different sound sources, two situations of binaural signal including and not including middle ear transfer response are considered. Parameters such as IACC, binaural time difference and W_{IACC} are derived by computing interaural crosscorrelation function. The effect of middle ear transfer response on sound source localization is then discussed in this paper. It is indicated through the results that middle ear transfer response doesn't affect the direction angle localization of sound source, but can affect the clearness of sound source, and to some degree, this affection is decided by frequency spectrum of sound source signal.

Key words human auditory system; HRTE; sound source localization

0 引言

声源定位是人耳听觉的一个重要功能. 在现实或虚拟的空间中, 利用声源定位, 人们能够判别一个或多个声源所处的位置, 通过不同声源的位置区分, 能够帮助我们正确理解声源信息. 比如, 多人谈话的办公室里, 多人挤在一起同时说话, 就很难听清每个人在说什么, 而如果把多人分开在不同的位置同时说话, 人们就能很专心地听清楚哪个人在说什么. 因此, 在创建的各种听觉模型中^[1], 声源定位是必须包括其中的重要组件.

根据对声音定位机理的研究, 双耳时间差在水平面的方向定位中被认为是最重要的定位因素^[2]. 由于双耳时间差和声源方位角之间有着单调的函数关系, 因而, 多数研究在建立水平面上的定位模型时, 都将它作为定位的理论基础. 关于双耳时间差的计算^[3], 较早的研究中都采取了一些简化措施, 比如, 完全不涉及人头的只考虑相距大约为人头直径的两点或考虑了人头但将双耳简化为人头两侧的相对两点. 现在的研究中, 由于测量 HRTF(head related transfer function 的缩写, 译为头相关传输函数)可以达到很高的精度, 通过测量或计算两耳(鼓膜或耳道入口处)的声音信号, 再去计算耳间互相关函数, 可以准确地得到

收稿日期: 2009-05-18 基金项目: 广东工业大学青年基金项目(082029).

作者简介: 郭天葵(1975-), 男, 博士, 讲师. 主要研究方向: 建筑声学. E-mail: acoustic@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

双耳时间差,这种方法由于考虑了人头及耳壳对声波的作用,被多数听觉定位模型所采用。

中耳是声音从鼓膜到内耳的传输通道.有研究指出^[4],计算耳间互相关函数,左右耳信号应该在内耳提取.因此,考虑中耳传输响应来计算耳间互相关函数很有必要.但是,据 ISO 3382 给出的建议^[5],它并没有考虑中耳传输响应去计算耳间互相关函数.因此,为了进一步明确中耳传输响应对计算耳间互相关函数的影响,以致对声源定位造成影响,本文从人耳结构出发,分别在人头加外耳(包括外耳道)及人头加外耳、中耳两个不同条件下,给定不同的声源信号,通过计算耳间互相关函数,分别得到 IACC、双耳时间差和耳间互相关函数的宽度 W_{IACC} 等三个声学参数,探讨中耳传输响应对声源定位的影响。

1 耳间互相关函数的定义

考虑声源到内耳的信号传递,左右耳的信号分别表示为

$$p_l(t) = s(t) * h_l(t) * e(t) * c(t) \quad (1)$$

$$p_r(t) = s(t) * h_r(t) * e(t) * c(t) \quad (2)$$

其中, $s(t)$ 是声源信号, $h_l(t)$ 和 $h_r(t)$ 分别是声源到左右耳耳道入口处的传输响应, $e(t)$ 是耳道的传输响应, $c(t)$ 是中耳的传输响应。

耳间互相关函数的定义式为

$$\Phi_r(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2T} \int_{-T}^T p_l(t) p_r(t - \tau) dt}{\frac{1}{2T} \sqrt{\int_{-T}^T p_l^2(t) dt \int_{-T}^T p_r^2(t) dt}} \quad (3)$$

$$IACC = |\Phi_r(\tau)|_{\max}$$

式中: τ 是相关时间, $IACC$ 是双耳互相关函数所取的最大值,其取值 ≤ 1 在这里,双耳时间差定义为双耳互相关函数取值为 $IACC$ 时所对应的相时间。

上式是耳间互相关函数在时域的计算,也可以将其转化为频域的计算,式子为:

$$\Phi_r(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} [H_l(\omega, \theta) H_r^*(\omega, \theta) |f(\omega)|^2] d\omega}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_l(\omega, \theta)|^2 |f(\omega)|^2 d\omega \int_{-\infty}^{\infty} |H_r(\omega, \theta)|^2 |f(\omega)|^2 d\omega}} \quad (4)$$

其中: $H_l(\omega, \theta)$, $H_r(\omega, \theta)$ 分别是声源到左右两耳的 HRTF, θ 为声源相对于头部的水平方位角, $|f(\omega)|^2$ 是声源信号的功率谱密度.本文都是在频域计算耳间互相关函数。

2 不同人耳条件下耳间互相关函数的计算

2.1 声源到鼓膜位置的信号传递

左右耳的信号从鼓膜提取由计算获得, HRTF 采用 M II 媒体实验室公开的数据库^[6], 该数据库的 HRTF 都是在鼓膜位置测得, 对应式 (1)、(2), 数据库的 HRTF 是 $h_l(t)$ 和 $e(t)$ 的卷积, 或是 $h_r(t)$ 和 $e(t)$ 的卷积, 所以, 左右耳信号的计算实际上只需 $s(t)$ 和 HRTF 之间卷积. 这里强调一下, HRTF 意指头相关传输函数, 它是一种频域呈现, 作为它的傅立叶反变换, 即在时域呈现, HRR 意指头相关脉冲响应, 文中为了便于称呼, 对 HRTF 和 HRR 不作区分。

2.2 声源到内耳的信号传递

左右耳信号从内耳提取, 为了计算左右耳信号, 采用

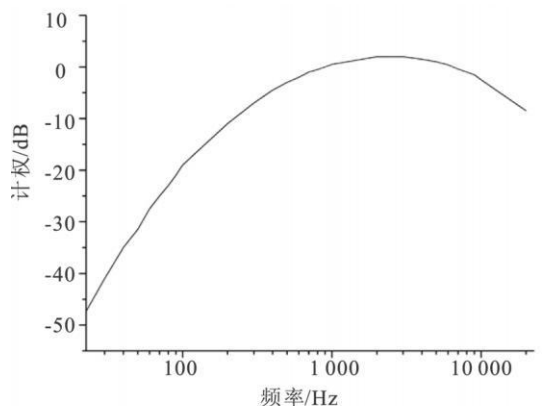


图1 A计权曲线

Fig.1 A-weighted curve

有关资料 [7] 中的 A 计权曲线 (频域呈现), 如图 1 所示, 为了便于应用, 先把它转换为最小相位归一化的 A 计权脉冲响应, 然后再进行傅立叶变换到频域形式, 据文献 [4] 提到, A 计权曲线近似为声源位于人头正前方时到内耳的传递函数, 因而, 中耳的传输响应 $c(t)$ 可由 A 计权曲线在频域除以人头正前方位置到鼓膜的传递函数获得, 这样, 在计算内耳的左右耳信号时, 仍采用 M II 媒体实验室公开的数据库, 对应式 (1)、(2), 只是增加了对中耳的传输响应 $c(t)$ 的卷积。

2.3 耳间互相关函数的计算

分别选用全频带的白噪声和粉红噪声以及一段男声语音和一段交响乐作为声源信号, 头相关传输函数在水平面上从正前方 0° 到正后方 180° 间隔 15° 共 13 个方位从数据库调用. 在不同人耳条件下计算耳间互相关函数, 然后由耳间互相关函数得到几个声学参数, 如 $IACC$ 、双耳时间差 τ_{IACC} 和耳间互相关函数的宽度 W_{IACC} (定义为 $IACC$ 减小 0.1 后所对应相关时间的宽度, 见图 2), 结果如图 3 图 4 和图 5 所示。

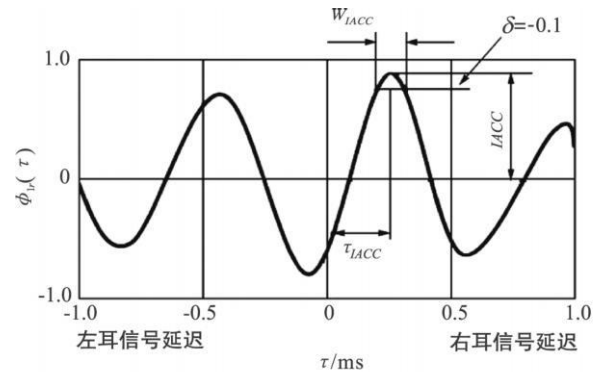


图2 耳间互相关函数中 $IACC$ 、 τ_{IACC} 和 W_{IACC} 的定义
Fig.2 Definitions of the $IACC$, τ_{IACC} and W_{IACC} in the interaural cross-correlation function

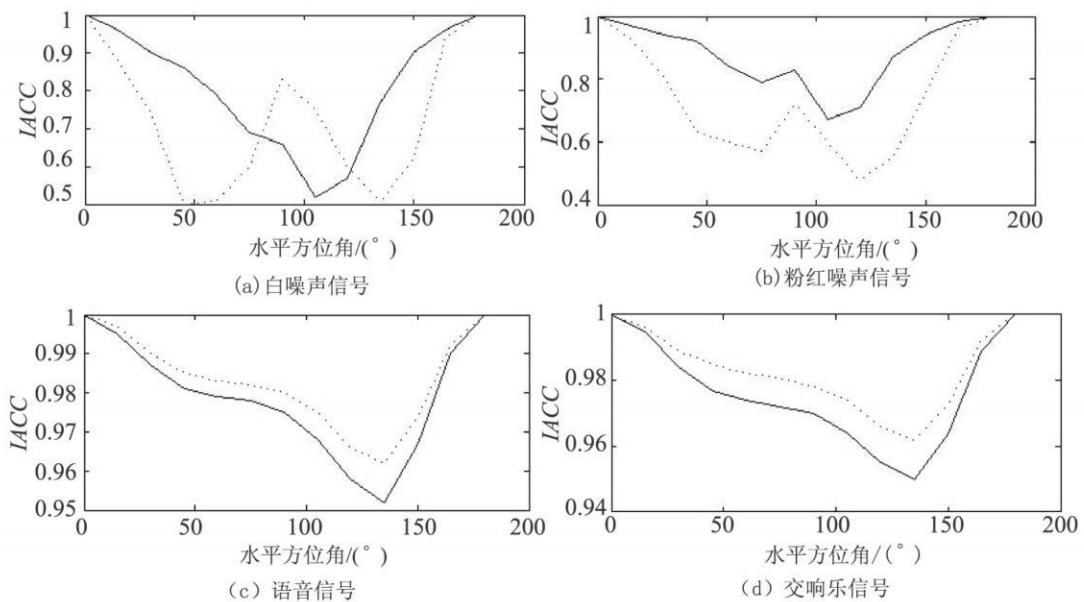


图3 $IACC$ 与水平方位角, 实线表示声源到鼓膜置的信号, 虚线表示声源到内耳的信号传递
Fig.3 Relationship between $IACC$ and azimuth(horizontal direction angle), solid line denotes signal transfer from sound to eardrum position, dashed line denotes signal transfer from sound source to inner ear

3 结果分析与讨论

图 3 各个分图表示的是在不同的声源条件下 $IACC$ 与水平方位角之间的关系. 实线表示声源到鼓膜位置的信号传递, 虚线表示声源到内耳的信号传递, 可以看到, 白噪声和粉红噪声的 $IACC$ 随水平方位角的变化呈现出相似的规律, 而语音和交响乐的 $IACC$ 随水平方位角的变化也呈现出相似的规律, 两种规律有不同的特点, 这应该是和声源信号所包含高频成分的多少有关系, 从频谱分布来看, 相比语音和交响乐, 白噪声和粉红噪声有较多的高频能量, 特别是白噪声的频谱是一条直线, 而粉红噪声的频谱是按每增加 1 倍频程幅度递减 3 dB 的衰减曲线, 所以白噪声的高频分量能量更高, 结果白噪声的 $IACC$ 在全部的水平方位角

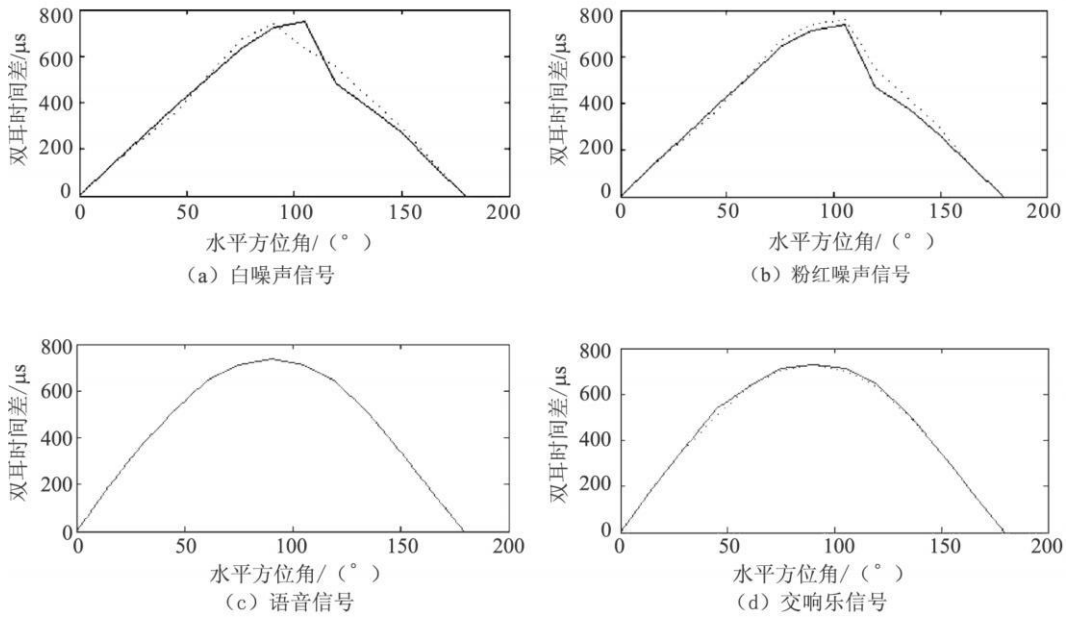


图4 双耳时间差与水平方位角, 实线和虚线的含义同图3

Fig.4 Relationship between ITD(interaural time difference) and azimuth(horizontal direction angle), the meanings of solid line and dashed are the same as fig.3

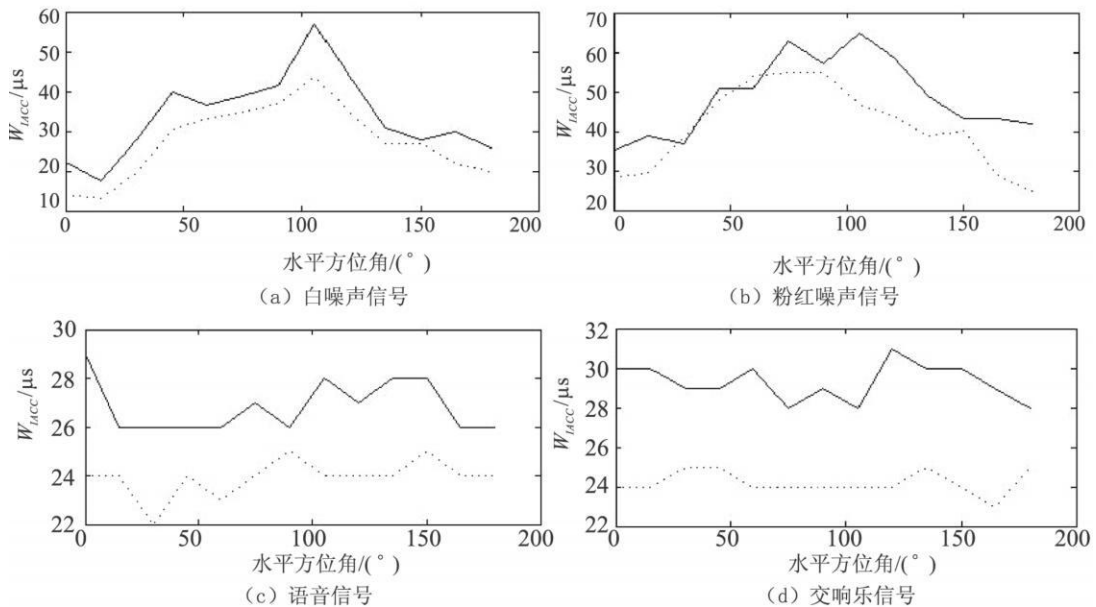


图5 耳间互相关函数的宽度与水平方位角, 实线和虚线的含义同图3

Fig.5 Relationship between W_{acc} and azimuth(horizontal direction angle), the meanings of solid line and dashed are the same as Fig.3

上平均看来(主要在侧面方向)显得更小些。再来看不同的信号传递路径对 ACC 的影响, 对两种噪声而言, 当考虑中耳传输响应, 如图中虚线所示, 声源在前侧方向 40° 到 70° 和后侧方向 120° 到 150° 时, ACC 都更小, 且在此区间达到极小, 即便是语音和交响乐信号, 虽然在前侧方向没有看到 ACC 的极小值出现, 但是在水平方位角从 50° 到 90° 的范围内, ACC 曲线近似平坦的呈现出较小值, 而在后侧方向, 类似噪声情形, ACC 也出现了极小值。这些结果说明, 在图中所指的一些侧向方向, 声源的方向性不是很明晰, 语音和交响乐的定位还好一点, 因为它们在侧向的 ACC 都在 0.94 以上, 声源方向还是很明晰, 但是对噪声来说, 在侧向的 ACC , 有的都在 0.60 以下, 声源方向变得很不明晰, 甚至难以辩明其方向。这些结果也支持

了现在普遍认同的厅堂声学结论, 也即是, 特别是对于音乐厅声场来说, 增加侧面方向的反射声有利于减小听众座位处的 $IACC$, 使音乐的环绕感和包围感得到加强。

图 4 表示的是双耳时间差和水平方位角之间的关系, 容易看到, 无论是何种声源信号, 也不管是否考虑了中耳传输响应, 由于四种声源信号都包含有丰富的中低频分量, 所以, 双耳时间差和水平方位角之间的这种单调函数关系几乎没有变化, 这些表现可由双耳时间差的定位机理来解释, 因为双耳时间差作为定位因素, 它只能作用于中低频段。

图 5 表示的是耳间互相关函数的宽度 W_{IACC} 和水平方位角之间的关系, 比较四个分图, 在噪声情形, 侧面方向的 W_{IACC} 会更大些, 说明侧面方位的声源宽度更宽些, 或是说声源方向的明晰度降低了, 这与图 3 的分析比较一致。但是在语音和交响乐情形, 没有看到这一现象, 总的看来, W_{IACC} 似乎不随水平方位角而变化。不过, 值得注意的是, 当考虑不同的信号传递路径对 W_{IACC} 的影响时, 中耳传输响应的加入, 无论对何种声源信号而言, 从整体上平均看来, W_{IACC} 都出现得更小, 说明声源的方向明晰度更好。这是一个非常重要的结论, 表明中耳传输响应在定位过程中的重要作用。

4 结 论

由上述分析和讨论可知, 中耳传输响应对声源定位的影响不能忽略, 明确的结论可以归结为: 考虑了中耳传输响应的双耳信号, 基本上不会影响声源方位角的定位, 通过计算耳间互相关函数得到的 $IACC$ 表明, 随着声源信号包含高频分量的能量越大, 侧面方向的声源明晰度明显降低, 在侧面方向的 $IACC$ 甚至会出现极小值, 而由计算得到的耳间互相关函数的宽度 W_{IACC} 还表明, 中耳传输响应的加入, 无论对何种声源信号而言, 从整体上平均看来, W_{IACC} 都出现得更小, 说明声源的方向明晰度更好。综合两方面的结论, 可评价中耳传输响应对声源定位的影响。

参考文献:

- [1] Gerkey R H, Anderson T K. Binaural and spatial hearing in real and virtual environments[M]. Mahwah, NJ Lawrence Erlbaum, 1997: 499-531.
- [2] Wrightman F L, Kistler D J. The dominant role of low frequency interaural time differences in sound localization[J]. J Acoust Soc Am, 1992, 91(3): 1648-1661.
- [3] 谢波荪. 头相关传输函数相位特性及双耳时间差的意义 [J]. 电声技术, 2006, 30(11): 40-45.
- [4] 安藤四一. 建筑声学 - 声源、声场与听众之融合 [M]. 吴硕贤, 赵越喆, 译. 天津: 天津大学出版社, 2006: 8-21.
- [5] ISO 3382-1997. Acoustics- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustic parameters[S].
- [6] MIT Media Lab. HRTF measurements of a KEMAR dummy-head microphone[DB/OL]. 1994-5/2008-5. <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [7] 马大猷, 沈豪. 声学手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 305.