



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103237287 A

(43) 申请公布日 2013. 08. 07

(21) 申请号 201310109533. 9

(22) 申请日 2013. 03. 29

(71) 申请人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路
381 号

(72) 发明人 谢菠荪 钟小丽 张承云

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限
公司 44102

代理人 何淑珍

(51) Int. Cl.

H04S 5/00 (2006. 01)

H04R 5/033 (2006. 01)

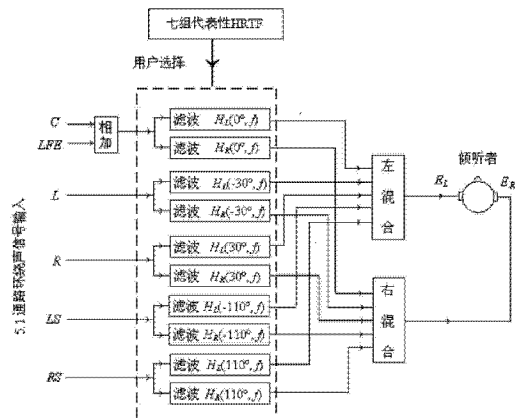
权利要求书2页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

具定制功能的 5. 1 通路环绕声耳机重放信号
处理方法

(57) 摘要

本发明公开了一种具定制功能的 5. 1 通路环
绕声耳机重放信号处理方法, 采用头相关传输
函数对输入的 5. 1 通路环绕声信号进行滤波, 将 5. 1
通路环绕声信号转换为适合一对耳机重放的双耳
信号。本发明提供七组具有代表性的头相关传输
函数数据供用户选择, 该方法能减少 5. 1 通路环
绕声的双耳 (虚拟) 耳机重放中虚拟声源头中
定位、前后混乱、感知仰角错误等问题, 同时使主
观试听选择匹配头相关传输函数数据过程简单易
行, 也减少了所需要的系统数据存储容量, 特别适
用于各种手持式播放设备的声音重放。



1. 具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法,其特征是,包括如下步骤:

步骤 1、以白噪声作为输入信号,分别用水平面左 -30° 、正前 0° 和右 30° 方向的双耳 HRTF 滤波,得到一组虚拟源定位的试验信号,分别采用七组代表性的 HRTF 进行滤波处理,得到七组虚拟源定位的试验信号;

步骤 2、分别将七组虚拟源定位的试验信号用耳机重放,倾听者选出其中主观听觉效果最好的一组信号,由此选出主观效果最好的一组 HRTF 数据;

步骤 3、读入原始 5.1 通路环绕声五通路信号:左通路信号 L,中心通路信号 C,右通路信号 R,左环绕通路信号 LS,右环绕通路信号 RS。

步骤 4、对读入的原始 5.1 通路环绕声进行信号处理并生成耳机信号输出到耳机进行重放。

2. 根据权利要求 1 所述的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法,其特征是,所述的七组代表性的 HRTF 是对一个包含 52 名中国人受试者的 HRTF 数据库进行个性化聚类分析,并选择相应的类中心 HRTF 所得。

3. 根据权利要求 1 所述的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法,其特征是,所述步骤 4 具体包括:

步骤 401、用选定的一组 HRTF 对读入的 5.1 通路环绕声信号进行直接滤波处理,也就是,用选定的 -30° 方向的一对 HRTF 对左通路信号 L 进行滤波;用选定的 0° 方向的一对 HRTF 对中心通路信号 C 进行滤波;用选定的 30° 方向的一对 HRTF 对右通路信号 R 进行滤波;用选定的 -110° 方向的一对 HRTF 对左环绕通路信号 LS 进行滤波;用选定的 110° 方向的一对 HRTF 对右环绕通路信号 RS 进行滤波;

步骤 402、将所有经过左耳 HRTF 滤波的信号混合成左通路耳机信号,经过右耳 HRTF 滤波的信号混合成右通路耳机信号;

步骤 403、将左、右通路的耳机信号输出到耳机进行重放。

4. 根据权利要求 1 所述的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法,其特征是,在扬声器布置和 HRTF 左右对称的情况下,所述步骤 4 具体包括:

步骤 411、将左通路信号 L 和右通路信号 R 分别进行相加和相减,得到前方和信号 $M = L+R$ 和前方差信号 $S = L-R$;将左环绕通路信号 LS 和右环绕通路信号 RS 分别进行相加和相减,得到环绕和信号 $M_s = LS+RS$ 以及环绕差信号 $S_s = LS-RS$;

步骤 412、将前方和信号 M 以及差信号 S 分别用一对选定的前方 30° 双耳 HRTF 的归一化和 $H_{\Sigma_1}(f) = 0.5[H_L(30^\circ, f) + H_R(30^\circ, f)]$ 以及归一化差 $H_{\Delta_1}(f) = 0.5[H_L(30^\circ, f) - H_R(30^\circ, f)]$ 滤波,得到滤波后的前方和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M$ 和滤波后的前方差信号 $H_{\Delta_1}(f)S$;

将环绕和信号 M_s 以及环绕差信号 S_s 分别用一对选定的 110° 双耳 HRTF 的归一化和 $H_{\Sigma_2}(f) = 0.5[H_L(110^\circ, f) + H_R(110^\circ, f)]$ 以及归一化差 $H_{\Delta_2}(f) = 0.5[H_L(110^\circ, f) - H_R(110^\circ, f)]$ 滤波,得到滤波后的环绕和信号 $H_{\Sigma_2}(f)M_s$ 和滤波后的环绕差信号 $H_{\Delta_2}(f)S_s$;

用选定 0° 方向的对称 HRTF $H_V(f) = H_L(0^\circ, f) = H_R(0^\circ, f)$ 对中心通路信号 C 进行滤波,得到滤波后的中心信号 $H_V(f)C$;

步骤 413、将滤波后的前方和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M$ 、滤波后的环绕和信号 $H_{\Sigma_2}(f)M_s$ 、滤波后的中心信号 $H_V(f)C$ 混合,得到混合滤波后和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M + H_{\Sigma_2}(f)M_s + H_V(f)C$;将滤波后的

前方差信号 $H_{\Delta_1}(f)S$ 、滤波后的环绕差信号 $H_{\Delta_2}(f)S_s$ 混合,得到混合滤波后差信号 $H_{\Delta_1}(f)S+H_{\Delta_2}(f)S_s$;

步骤 414、对混合滤波后和信号及混合滤波后差信号分别进行相加和相减,得到左、右通路的耳机信号;

步骤 415、将左、右通路的耳机信号输出到耳机进行重放。

具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及 5.1 通路环绕声技术领域,具体涉及一种具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法。

背景技术

[0002] 5.1 通路系统已被国际电信联盟 (ITU) 推荐为环绕声的国际标准,并已被广泛应用于家庭影院、多媒体计算机和各种手持式播放设备的声音重放。它采用前方左 L、中 C、右 R 以及左环绕 LS、右环绕 RS 共五个独立的全频带通路及扬声器,再加上一路可选择的低频效果通路 LFE,从而重放出环绕倾听者的声音听觉效果。按国际电信联盟推荐的标准,各扬声器的布置如图 1 所示,方位角分别为 (空间方位由仰角 $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 和方位角 $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 表示。其中 $\phi = -90^\circ$ 、 0° 和 90° 分别表示下方,水平面和上方。水平面内 $\theta = -90^\circ$ 、 0° 、 90° 和 180° 分别代表左、前、右和后方) :

$$[0003] \quad \theta_L = -30^\circ \quad \theta_C = 0^\circ \quad \theta_R = 30^\circ \quad \theta_{LS} = -110^\circ \quad \theta_{RS} = 110^\circ \quad (1)$$

[0004] 5.1 通路系统本来是为扬声器重放而设计的。但在多媒体计算机和各种手持式播放设备的应用中,经常将 5.1 通路信号直接向下混合成两通路的信号并用耳机重放。这会导致头中定位 (声音感知在头内而不是头外) 等不自然听觉效果。

[0005] 国内外研究已提出了一些 5.1 通路环绕声的双耳 (虚拟) 耳机重放方法,如 Dolby 实验室的 Dolby 耳机技术,或华南理工大学的双耳虚拟环绕声信号去相关技术 (国家发明专利授权 :ZL02134415.9)。这类技术涉及到头相关传输函数 (英文全名 Head Related Transfer Function,缩写为 HRTF) 信号处理,这是一类在声重放中虚拟空间声源的技术。5.1 通路环绕声的双耳 (虚拟) 耳机重放的基本原理如图 2 所示,将 5.1 通路环绕声的五个全频带信号分别用相应扬声器方向的头相关传输函数 (HRTF) 滤波后,再混合成两通路耳机重放信号 :

$$[0006] \quad E_L = H_L(\theta_L, f)L + H_L(\theta_R, f)R + H_L(\theta_C, f)C + H_L(\theta_{LS}, f)LS + H_L(\theta_{RS}, f)RS$$

$$[0007] \quad E_R = H_R(\theta_L, f)L + H_R(\theta_R, f)R + H_R(\theta_C, f)C + H_R(\theta_{LS}, f)LS + H_R(\theta_{RS}, f)RS \quad (2)$$

[0008] H_L 和 H_R 分别是声源 (5.1 通路环绕声的扬声器) 到左和右耳的 HRTF,并且已在图 1 标出, f 代表频率 (这里略去了低频效果通路 LFE,事实上,对 LFE 通路信号的处理和 C 信号是类似的)。由于图 2 或 (2) 式的信号处理模拟了 5.1 通路环绕声重放中声波从扬声器到倾听者双耳的声学传输过程,因而在一定程度上改善了耳机重放的效果。

[0009] 图 2 或 (2) 式的直接实现需要 10 个 HRTF 滤波器,信号处理相对复杂。在实际的应用中也经常将 HRTF 近似成左、右对称,则信号处理可以简化。在左、右对称的情况下,各扬声器到左、右耳的 HRTF 满足以下的对称关系 :

$$[0010] \quad H_L(\theta_L, f) = H_R(\theta_R, f) = H_{\alpha_1}(f) \quad H_L(\theta_R, f) = H_R(\theta_L, f) = H_{\beta_1}(f)$$

$$[0011] \quad H_L(\theta_{LS}, f) = H_R(\theta_{RS}, f) = H_{\alpha_2}(f) \quad H_L(\theta_{RS}, f) = H_R(\theta_{LS}, f) = H_{\beta_2}(f) \quad (3)$$

$$[0012] \quad H_L(\theta_C, f) = H_R(\theta_C, f) = H_V(f)$$

[0013] 这时,上面 (2) 式的信号处理在数学上是和下面的矩阵公式是等价的,并可用图 3

的方法实现：

[0014]

$$\begin{bmatrix} E_L \\ E_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} H_{\Sigma 1}(f) & 0 \\ 0 & H_{\Delta 1}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{\gamma}(f) \\ 0 \end{bmatrix} C + \begin{bmatrix} H_{\Sigma 2}(f) & 0 \\ 0 & H_{\Delta 2}(f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LS \\ RS \end{bmatrix} \right\}, \quad (4)$$

[0015] 其中：

$$[0016] \quad H_{\Sigma 1}(f) = 0.5[H_{\alpha 1}(f) + H_{\beta 1}(f)] \quad H_{\Delta 1}(f) = 0.5[H_{\alpha 1}(f) - H_{\beta 1}(f)]$$

$$[0017] \quad H_{\Sigma 2}(f) = 0.5[H_{\alpha 2}(f) + H_{\beta 2}(f)] \quad H_{\Delta 2}(f) = 0.5[H_{\alpha 2}(f) - H_{\beta 2}(f)] \quad (5)$$

[0018] 图 3 的对称实现共需要 5 个滤波器。

[0019] HRTF 是自由场情况下声源到倾听者双耳的声学传输函数,反映了倾听者头部、耳廓、躯干等生理结构对入射声波的散射或综合滤波作用。因而 HRTF 不但和声源位置以及频率有关,并且和倾听者的生理结构、尺寸有关。不同倾听者的 HRTF 是不同的。理想情况下,应在图 2 和图 3 或 (2) 和 (4) 式中采用倾听者自身的 HRTF 进行信号处理,才能得到理想的耳机重放效果。

[0020] HRTF 通常是通过实验测量而得到的。但测量 HRTF 需要特殊的设备和环境,要对每个倾听者(耳机重放设备的用户)进行 HRTF 测量是不实际的。在实际应用中,只采用了一组特定的 HRTF 进行信号处理,一般是在特定受试者或人工头仿真模型上测量得到的通用 HRTF。由于信号处理的 HRTF 与实际的倾听者可能不匹配,因而耳机重放中经常出现虚拟声源头中定位、前后混乱、感知仰角错误等问题。

[0021] 由于不同人的 HRTF 可能会存在一定的相似性,应用中可以提供包含多名受试者的 HRTF 基线数据组,让倾听者通过主观试听从中选择出匹配(合适其自身)的 HRTF 数据,并用于信号处理。虽然这种方法避免了对每个倾听者进行 HRTF 测量的麻烦,但为了代表不同人生理结构的多样性,基线数据组应含有足够数量受试者的 HRTF 数据(通常几十人以上)。而采用主观试听的方法从大量受试者的 HRTF 数据组中挑选出匹配的 HRTF 数据也是不实际的。同时,在各种手持式播放设备中,由于系统的数据存储容量的限制,要存储大量受试者的 HRTF 数据也是困难的。

[0022] R. H. Y. So 等人和 R. P. Tame 等人的两项研究工作表明,不同人的 HRTF 具有一定的相似性,并具有一定的个性化聚类趋势。这有可能用于简化挑选匹配 HRTF 的过程。但该两项工作只研究了正前方与正后方的 HRTF 聚类问题,其结果不能用于 5.1 通路环绕声的耳机重放。并且该两项研究是基于西方人受试者的 HRTF 数据,考虑到不同人群(种族)HRTF 之间的统计差异,以上两项研究的结果也不完全适合于中国人。谢菠荪和钟小丽也研究了不同受试者全空间 493 个方向的 HRTF 的平均相似性与聚类,但全空间方向的平均相似性与聚类结果也不能直接用于 5.1 通路环绕声的耳机重放。至于有些研究涉及的是不同方向 HRTF 的空间聚类(如 S. Shimada 等人的研究, C. S. Fahn 和 Y. C. Lo 等人的研究),而不是不同人的个性化 HRTF 聚类,其结果与本发明无关。

发明内容

[0023] 本发明为解决上述现有技术中存在的缺陷,提供具定制功能的 5.1 通路环绕声耳

机重放信号处理方法。本发明提供从中国人受试者得到的七组具有代表性的 HRTF 数据供用户选择,该方法能减少 5.1 通路环绕声的双耳(虚拟)耳机重放中虚拟声源头中定位、前后混乱、感知仰角错误等问题,同时使主观试听选择匹配数据处理简单易行,也减少了所需要的系统数据存储容量,特别适用于各种手持式播放设备的声音重放。

[0024] 本发明的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理方法,包括如下步骤:

[0025] 步骤 1、以白噪声作为输入信号,分别用水平面左 -30° 、正前 0° 和右 30° 方向的双耳 HRTF 滤波,得到一组虚拟源定位的试验信号,分别采用七组代表性的 HRTF 进行滤波处理,得到七组虚拟源定位的试验信号;

[0026] 步骤 2、分别将七组虚拟源定位的试验信号用耳机重放,倾听者选出其中主观听觉效果最好的一组信号,由此选出主观效果最好的一组 HRTF 数据;

[0027] 步骤 3、读入原始 5.1 通路环绕声五通路信号:左通路信号 L,中心通路信号 C,右通路信号 R,左环绕通路信号 LS,右环绕通路信号 RS。

[0028] 步骤 4、对读入的原始 5.1 通路环绕声进行信号处理并生成耳机信号输出到耳机进行重放。

[0029] 具体地,所述的七组代表性的 HRTF 是对一个包含 52 名中国人受试者的 HRTF 数据库进行个性化聚类分析,并选择相应的类中心 HRTF 所得。但本方法的实施也适合于其他受试者的 HRTF 数据库,不限于使用中国人受试者的 HRTF 数据库。

[0030] 较佳地,在本发明的一个实施例中,所述步骤 4 具体包括:

[0031] 步骤 401、用选定的一组 HRTF 对读入的 5.1 通路环绕声信号进行直接滤波处理,也就是,用选定的 -30° 方向的一对(左、右耳)HRTF 对左通路信号 L 进行滤波;用选定的 0° 方向的一对 HRTF 对中心通路信号 C 进行滤波;用选定的 30° 方向的一对 HRTF 对右通路信号 R 进行滤波;用选定的 -110° 方向的一对 HRTF 对左环绕通路信号 LS 进行滤波;用选定的 110° 方向的一对 HRTF 对右环绕通路信号 RS 进行滤波。

[0032] 步骤 402、将所有经过左耳 HRTF 滤波的信号混合成左通路耳机信号,经过右耳 HRTF 滤波的信号混合成右通路耳机信号。

[0033] 步骤 403、将左、右通路的耳机信号输出到耳机进行重放。

[0034] 较佳地,在本发明的另一实施例中,在扬声器布置和 HRTF 左右对称的情况下,所述步骤 4 具体包括:

[0035] 步骤 411、将左通路信号 L 和右通路信号 R 分别进行相加和相减,得到前方和信号 $M = L+R$ 和前方差信号 $S = L-R$;将左环绕通路信号 LS 和右环绕通路信号 RS 分别进行相加和相减,得到环绕和信号 $M_s = LS+RS$ 以及环绕差信号 $S_s = LS-RS$;

[0036] 步骤 412、将前方和信号 M 以及差信号 S 分别用一对选定的前方 30° 双耳 HRTF 的归一化和 $H_{\Sigma_1}(f) = 0.5[H_L(30^\circ, f) + H_R(30^\circ, f)]$ 以及归一化差 $H_{\Delta_1}(f) = 0.5[H_L(30^\circ, f) - H_R(30^\circ, f)]$ 滤波,得到滤波后的前方和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M$ 和滤波后的前方差信号 $H_{\Delta_1}(f)S$;

[0037] 将环绕和信号 M_s 以及环绕差信号 S_s 分别用一对选定的 110° 双耳 HRTF 的归一化和 $H_{\Sigma_2}(f) = 0.5[H_L(110^\circ, f) + H_R(110^\circ, f)]$ 以及归一化差 $H_{\Delta_2}(f) = 0.5[H_L(110^\circ, f) - H_R(110^\circ, f)]$ 滤波,得到滤波后的环绕和信号 $H_{\Sigma_2}(f)M_s$ 和滤波后的环绕差信号 $H_{\Delta_2}(f)S_s$;

[0038] 用选定 0° 方向的对称 HRTF $H_v(f) = H_L(0^\circ, f) = H_R(0^\circ, f)$ 对中心通路信号 C

进行滤波,得到滤波后的中心信号 $H_{\gamma}(f)C$;

[0039] 步骤 413、将滤波后的前方和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M$ 、滤波后的环绕和信号 $H_{\Sigma_2}(f)M_s$ 、滤波后的中心信号 $H_{\gamma}(f)C$ 混合,得到混合滤波后和信号 $H_{\Sigma_1}(f)M+H_{\Sigma_2}(f)M_s+H_{\gamma}(f)C$;将滤波后的前方差信号 $H_{\Delta_1}(f)S$ 、滤波后的环绕差信号 $H_{\Delta_2}(f)S_s$ 混合,得到混合滤波后差信号 $H_{\Delta_1}(f)S+H_{\Delta_2}(f)S_s$;

[0040] 步骤 414、对混合滤波后和信号及混合滤波后差信号分别进行相加和相减,得到左、右通路的耳机信号;

[0041] 步骤 415、将左、右通路的耳机信号输出到耳机进行重放。

[0042] 本发明的原理是:理想情况下,5.1 通路环绕声耳机重放需要个性化 HRTF 进行信号处理。但不同人的 HRTF 也具有一定的相似性和个性化聚类趋势。对现有的中国人 HRTF 数据库进行统计分析,可将大部分受试者的 HRTF 分为七个类,每一类的 HRTF 都可以用其类中心的 HRTF 近似代表。相应地,在 5.1 通路环绕声耳机重放中,提供七组与类中心对应的 HRTF 供选择,倾听者通过主观试听的方法从中选择出匹配的 HRTF 数据并用于信号处理,从而减少 5.1 通路环绕声耳机重放中虚拟声源头中定位、前后混乱、感知仰角错误等问题,改善重放效果。

[0043] 本发明与现有技术相比,具有如下优点和有益效果:

[0044] 1. 本发明对 5.1 通路环绕声的 5+1 个独立原始信号进行处理后,用一对耳机重放,可产生类似于真实扬声器重放的环绕声效果;

[0045] 2. 本发明提供七组具有代表性的 HRTF 数据供用户选择,通过主观试听的方法得到最为匹配的 HRTF 数据并用其进行信号处理,该方法能减少 5.1 通路环绕声的双耳(虚拟)耳机重放中虚拟声源头中定位、前后混乱、感知仰角错误等问题,且主观试听的工作量小,方便于实际应用;

[0046] 3. 本发明可采用通用信号处理芯片(DSP 硬件)电路或专用的集成电路实现,也可采用算法语言(如 VC++) 编制的软件在多媒体计算机上实现;

[0047] 4. 本发明可作为算法写入专用硬件芯片,用于 DVD 和各种便携式播放设备如 MP3、MP4、iPhone 等方面的声音重放,也可作为硬件或软件用在多媒体计算机的声音重放。

附图说明

[0048] 图 1 是 5.1 通路环绕声的扬声器布置;

[0049] 图 2 是 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理的直接实现方法原理图;

[0050] 图 3 是 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理的对称实现方法原理图;

[0051] 图 4 是本发明的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理直接实现原理图;

[0052] 图 5 是本发明的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理对称实现原理;

[0053] 图 6 是本发明所用的七组具有代表性的 HRTF 数据;

[0054] 图 7 是多媒体计算机实现的信号处理软件的流程图;

具体实施方式

[0055] 下面结合附图对本发明作进一步地说明。

[0056] 图 4 是本发明的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理直接实现原理图；它采用五对 HRTF 对输入的 5.1 通路环绕声信号进行滤波处理并混合后，再用耳机重放。所用的五对 HRTF（左、右各五）是和图 1 给出的 5.1 通路环绕声扬声器的位置相对应的。

[0057] 图 5 是本发明的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号处理对称实现原理图。

[0058] 本发明提供了七组（每组五对）具有代表性的 HRTF 数据供用户选择，用户可根据主观听觉效果选择其中任一组 HRTF 数据进行滤波处理。七组具有代表性的 HRTF 数据是通过以下的考虑和方法得到的。

[0059] 在 5.1 通路环绕声的扬声器重放中，对前方左、中、右三个通路的准确定位较两个环绕通路重要。并且在 5.1 通路环绕声的双耳重放中，当信号处理的 HRTF 与实际的倾听者不匹配时，前后混乱错误（前方的虚拟声源被感知在后方）较后前混乱错误（后方的虚拟声源被感知在前方）常见得多。因此，为了增强耳机重放中前方定位的准确性，我们根据三个前方通路方向，也就是左 -30° 、正前 0° 和右 30° 的不同个体 HRTF 的相似性来选择具有代表性的 HRTF 数据组，而不用考虑左环绕 -110° 和右环绕 110° 方向不同个体的 HRTF 相似性。

[0060] 通过对已有的 HRTF 数据库进行统计分析，就可以得到有代表性的 HRTF 数据组。本发明采用的 HRTF 数据库包含有 52 名中国人受试者（26 男，26 女，编号为 1 至 52）。原始的数据是双耳头相关脉冲响应（HRIR，HRTF 的时域形式），采用封闭耳道法测量得到。原始数据的采样频率是 44.1kHz，长度是 512 点，用矩形时间窗对其进行截断后再通过离散傅立叶变换，得到 128 点的频域 HRTF。为了在分析中消除与听觉感知无关的 HRTF 精细谱结构，采用 1ERB（听觉等效矩形滤波器宽度）的频率窗对 HRTF 进行平滑。

[0061] 设 $H_\alpha(\theta_i, k, s)$ 代表 HRTF 幅度。这里 $\alpha = L$ 或 R 代表左或右耳； $\theta_i = -30^\circ$ 、 0° 和 30° 分别代表三个前方扬声器的位置； $k = 0, 1 \cdots (N-1)$ 是离散频率； $s = 1, 2 \cdots 52$ 是 HRTF 数据库中受试者的编号。对特定的耳 α ，特定的位置 θ_i ，受试者 s 和 s' 的 HRTF 幅度之间的相似性由下式的归一化相关系数表述

[0062]

$$c_\alpha(\theta_i, s, s') = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} [H_\alpha(\theta_i, k, s) - \bar{H}_\alpha(\theta_i, s)] [H_\alpha(\theta_i, k, s') - \bar{H}_\alpha(\theta_i, s')]}{\sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^{N-1} [H_\alpha(\theta_i, k, s) - \bar{H}_\alpha(\theta_i, s)]^2 \right\} \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} [H_\alpha(\theta_i, k, s') - \bar{H}_\alpha(\theta_i, s')]^2 \right\}}} \quad (6)$$

[0063] 其中

$$[0064] \quad \bar{H}_\alpha(\theta_i, s) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_\alpha(\theta_i, k, s)$$

$$\bar{H}_\alpha(\theta_i, s') = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_\alpha(\theta_i, k, s') \quad (7)$$

[0065] 分别是受试者 s 和 s' 的 HRTF 幅度在 N 个离散频率的平均值。由于在非常高的频率，HRTF 幅度对定位的贡献很小，且这时 HRTF 的测量误差也比较大，这里的分析取 $N = 42$ 。这对应于 0 到 14kHz 的频率范围，已包含 HRTF 幅度的主要定位信息。

[0066] 将归一化相关系数对双耳和三个前方扬声器方向平均，得到平均相关系数：

[0067]

$$MCC(s, s') = \frac{1}{2 \times 3} \sum_{\theta_i} \sum_{\alpha} c_{\alpha}(\theta_i, s, s') \quad (8)$$

[0068] MCC 描述了任意一对受试者之间三个前方向双耳 HRTF 幅度的相似性, 并且 $0 \leq |MCC| \leq 1$ 。MCC 越接近 1, 相似性越高。

[0069] 根据 MCC, 可以定义每对受试者 HRTF 幅度之间的距离:

[0070]

$$D(s, s') = \sqrt{2[1 - MCC(s, s')]} \quad (9)$$

[0071] 当一对受试者的 HRTF 幅度是相同时, $MCC(s, s') = 1$ 而 $D(s, s') = 0$ 。52 名受试者的所有配对组合的 $D(s, s')$ 组成一个 52×52 对称矩阵 [D], 其对角元素为零。利用平均距离, 可以从矩阵 [D] 得到一个 HRTF 幅度聚类的树。与每一个类中心对应的 HRTF 数据组就是代表性的 HRTF 数据组。

[0072] 通过具体的计算, 在所用 HRTF 数据库的 52 名受试者的每一对受试者组合中, 最大的平均相关系数 MCC 是 0.975, 最小 MCC 是 0.374, 将有受试者对组合的 MCC 平均是 0.875。本发明选择 (9) 式的距离极限 $D(s, s') = 0.400$ 作为分类的标准, 对应于平均相关系数 $MCC(s, s') = 0.920$, 52 名受试者中的大多数受试者 (42 名) 的 HRTF 数据可分成七大类, 每一类的数据都可以用相应的类中心 HRTF 近似代表。表 1 是 HRTF 聚类的结果, 其类中心即为本发明所用的七组具有代表性的 HRTF 数据, 图 6 是其 HRTF 幅度。

[0073] 表 1

[0074]

	包含受试者数目	受试者编号	类中心受试者编号	类中心与同类受试者之间的平均 MCC
第 1 类	23	35,36,38,44,6,41,22,30,42,51,29,27,28,26,8,45,2,18,39,52,5,16,15.	22	0.947
第 2 类	4	13,19,48,50.	48	0.950
第 3 类	2	9,31	9	0.936
第 4 类	7	3,43,4,23,46,47,25	23	0.943
第 5 类	2	10,14	10	0.945
第 6 类	2	11,21	11	0.921
第 7 类	2	34,49	34	0.929

[0075] 本发明可以利用通用的信号处理芯片所做成的硬件电路实现, 也可以设计成专用的集成电路芯片实现, 还可以设计成软件在多媒体计算机上实现。本发明可用于 DVD 和各种便携式播放设备的声音重放, 也可作为硬件或软件用在多媒体计算机的声音重放。

[0076] DVD 与各种便携式播放设备的应用

[0077] 将 DVD 解码输出或其它信源得到的 5.1 通路环绕声 (数字) 信号按图 4 或图 5 的方法进行双耳 (虚拟) 处理后, 得到两路信号, 然后分别馈给一对耳机重放出环绕声的效果。其中, 双耳处理可作为 DVD 或各种便携式播放设备机内的一部分硬件电路。

[0078] 多媒体计算机的应用

[0079] 由计算机的 DVD-ROM 或硬盘读取,并经解码得到 5.1 通路环绕声(数字)信号,然后用计算机软件按图 4 或图 5 的方法进行双耳(虚拟)处理,也可以在计算机的声卡上用专用的硬件电路实现,得到两路信号,然后分别馈给一对耳机重放出环绕声的效果。

[0080] 图 7 是在多媒体计算机中用信号处理软件实现的具定制功能的 5.1 通路环绕声耳机重放信号直接处理流程图。

[0081] 第一步、以白噪声作为输入信号,分别用 5.1 通路环绕声的左通路方向(-30°)、中心通路方向(0°)和右通路方向(30°)的 HRTF 滤波,得到一组虚拟源定位的试验信号,分别采用七组代表性的 HRTF 进行滤波处理,得到七组虚拟源定位的试验信号;

[0082] 第二步、倾听者通过图形界面分别选择七组试验信号重放,通过声卡输出到耳机进行试听,并选出其中主观听觉(定位)效果最好的一组信号。实际重放将用主观效果最好的一组代表性 HRTF 进行处理;

[0083] 第三步、从 DVD-ROM 或硬盘读入原始的 5.1 通路环绕声信号:左通路信号 L,中心通路信号 C,右通路信号 R,左环绕通路信号 LS,右环绕通路信号 RS;

[0084] 第四步、用选定的一组 HRTF 对读入的 5.1 通路环绕声信号进行滤波处理,也就是,用选定的 -30° 方向的一对(左、右耳)HRTF 对左通路信号 L 进行滤波;用选定的 0° 方向的一对 HRTF 对中心通路信号 C 进行滤波;用选定的 30° 方向的一对 HRTF 对右通路信号 R 进行滤波;用选定的 -110° 方向的一对 HRTF 对左环绕通路信号 LS 进行滤波;用选定的 110° 方向的一对 HRTF 对右环绕通路信号 RS 进行滤波;

[0085] 第五步、将所有经过左耳 HRTF 滤波的信号混合成左通路耳机信号,经过右耳 HRTF 滤波的信号混合成右通路耳机信号;

[0086] 第六步、将混合后的左、右两通路耳机信号通过声卡输出到耳机进行重放。

[0087] 如上所述,即可较好地实现本发明。

[0088] 用虚拟源定位实验验证了本发明的实际效果。用软件在计算机中产生与原始的 5.1 通路环绕声每一独立通路对应的白噪声输入信号,长度 2.5 秒。将输入信号分别与 5.1 通路环绕声五个方向相对应的 HRTF 滤波并混合后,用一对 Etymotic ER-2 入耳式探管耳机重放。分别采用七组代表性的 HRTF(记为代表性 HRTF 1 到 7)进行滤波处理。为了比较,同时也采用 KEMAR 人工头仿真模型上测量得到的通用 HRTF 进行滤波处理。

[0089] 实验在一间经过吸声和隔声处理的听音室内进行,本底噪声级不大于 30dB A。重放时双耳声压级等效于约 75dB 的自由场声压级。在 5.1 通路环绕声的耳机重放实验中,目标虚拟声源方向共有五个,即左前 -30° ,正前 0° ,右前 30° ,左环绕 -110° 和右环绕 110° 。实验中倾听者判断感知虚拟声源的位置(包括方向和距离),并用电磁跟踪器(Polhemus FASTRAK)指示感知虚拟声源位置。如果倾听者感知到虚拟声源在头内,则通过口头报告而不纪录精确的位置。在每一种实验条件下,包括处理用的 HRTF 数据,目标虚拟声源位置,每名倾听者对感知虚拟声源位置作六次重复的判断。因此对三个前目标虚拟声源方向,每名倾听者共有 3 方向 \times 6 重复 = 18 个判断;对两个环绕目标虚拟声源方向,每名倾听者共有 2 方向 \times 6 重复 = 12 个判断。共 10 名倾听者(编号 N1-10)参加了实验。

[0090] 对每名倾听者的定位结果,分别作以下的统计分析:

[0091] (1) 前目标虚拟声源方向的头中定位百分比和环绕目标虚拟声源方向的头中定位百分比;

[0092] (2) 前目标虚拟声源方向的前后定位混乱百分比和环绕目标虚拟声源方向的后前定位混乱百分比；

[0093] (3) 前目标虚拟声源方向的平均绝对感知仰角错误和环绕目标虚拟声源方向的平均绝对感知仰角错误

[0094]

$$\Delta\phi = \frac{1}{L \times J} \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L |\phi_l(j, l) - \phi_s(j)| \quad (10)$$

[0095] (4) 前目标虚拟声源方向的平均绝对感知方位角错误和环绕目标虚拟声源方向的平均绝对感知方位角错误

[0096]

$$\Delta\theta = \frac{1}{L \times J} \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L |\theta_l(j, l) - \theta_s(j)| \quad (11)$$

[0097] 在 (10) 和 (11) 式中, $\phi_s(j)$ 和 $\theta_s(j)$ 分别是第 j 个目标虚拟声源的仰角和方位角; J 是总的目标虚拟声源数目, 对前方向 $J = 3$, 环绕方向 $J = 2$; $\phi_l(j, l)$ 和 $\theta_l(j, l)$ 分别是对第 j 个目标虚拟声源的第 l 次头外定位判断的仰角和方位角; L 是每种情况下头外定位判断的总次数。

[0098] 表 2 列出了对 10 名倾听者定位实验的统计结果, 表中给出了采用最佳的代表性 HRTF 处理和 KEMAR 人工头仿真模型 HRTF 处理的结果。与 KEMAR 人工头仿真模型 HRTF 处理的结果相比较, 对大多数 (10 名中的 8 名, 编号 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10), 在三个前目标虚拟声源方向, 采用本发明的最佳的代表性 HRTF 处理至少能减少头中定位、前后混乱、仰角错误三个错误中的其中一个; 同时在两个环绕目标虚拟声源方向能得到合理的定位性能。因此, 主观实验证实本发明能在一定程度上改善 5.1 通路环绕声双耳耳机重放的定位效果。

[0099] 表 2

[0100]

受试者	目标方向	最佳代表性 HRTF 处理					KEMAR HRTF 处理				
		类中心	头中定位 (%)	混乱率 (%)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\theta$ (°)	头中定位 (%)	混乱率 (%)	$\Delta\phi$ (°)	$\Delta\theta$ (°)	
N1	前	中心 7	0	0	7	6	0	0	18	8	
	环绕		0	0	15	29	0	0	25	27	
N2	前	中心 2	0	0	17	7	11	0	27	16	
	环绕		0	0	10	10	0	0	19	14	
N3	前	中心 1	11	0	20	8	44	0	22	6	
	环绕		0	8	16	26	0	0	12	29	
N4	前	中心 6	0	0	32	19	28	15	35	21	
	环绕		0	0	7	7	0	0	9	8	
N5	前	中心 5	33	0	41	29	28	8	52	39	
	环绕		0	0	16	9	0	0	18	9	
N6	前	中心 7	0	0	39	5	6	6	53	15	
	环绕		0	0	19	23	0	0	22	15	
N7	前	无	---	---	---	---	33	83	---	---	
	环绕		---	---	---	---	---	---	---	---	
N8	前	无	---	---	---	---	44	90	---	---	
	环绕		---	---	---	---	---	---	---	---	
N9	前	中心 5	33	0	19	46	33	6	25	47	
	环绕		0	0	7	16	0	0	10	14	
N10	前	中心 6	0	0	27	7	0	0	32	9	
	环绕		0	0	4	19	0	0	11	17	

[0101] 本发明得到国家自然科学基金《编号:11004064》、广州市科技项目计划《编号:2011DH014》和亚热带建筑科学国家重点实验室资助项目的资助。

[0102] 本发明的上述实施例仅仅是为清楚地说明本发明所作的举例,而并非是对本发明的实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说,在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明权利要求的保护范围之内。

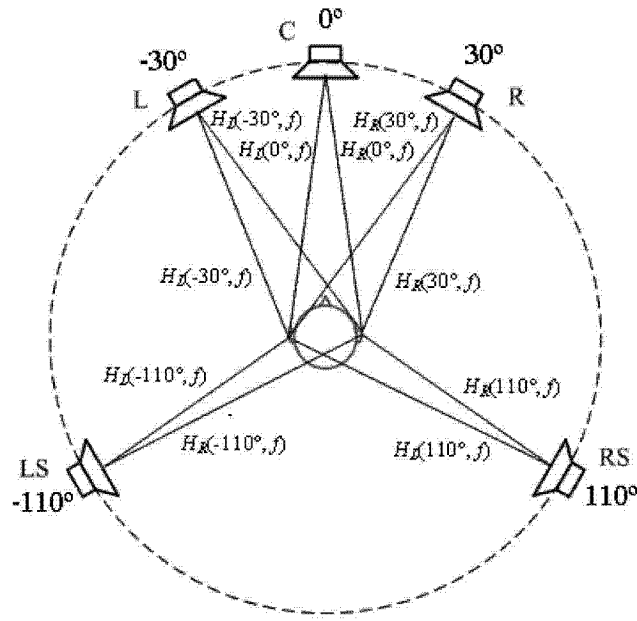


图 1

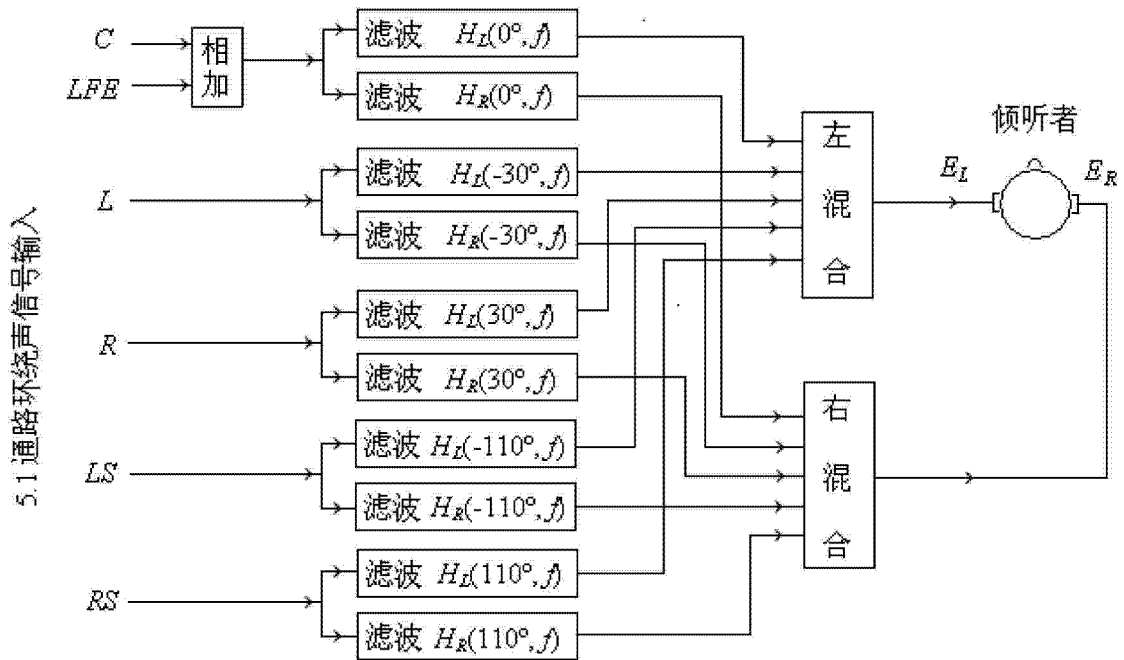


图 2

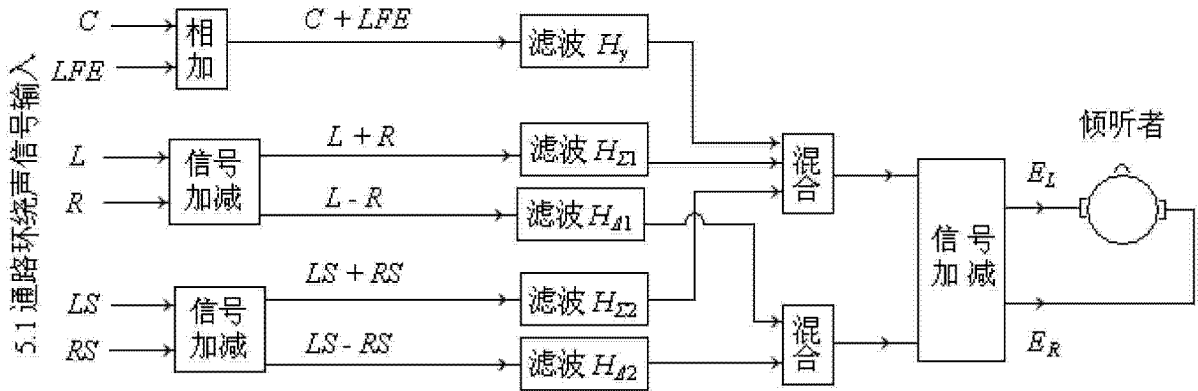


图 3

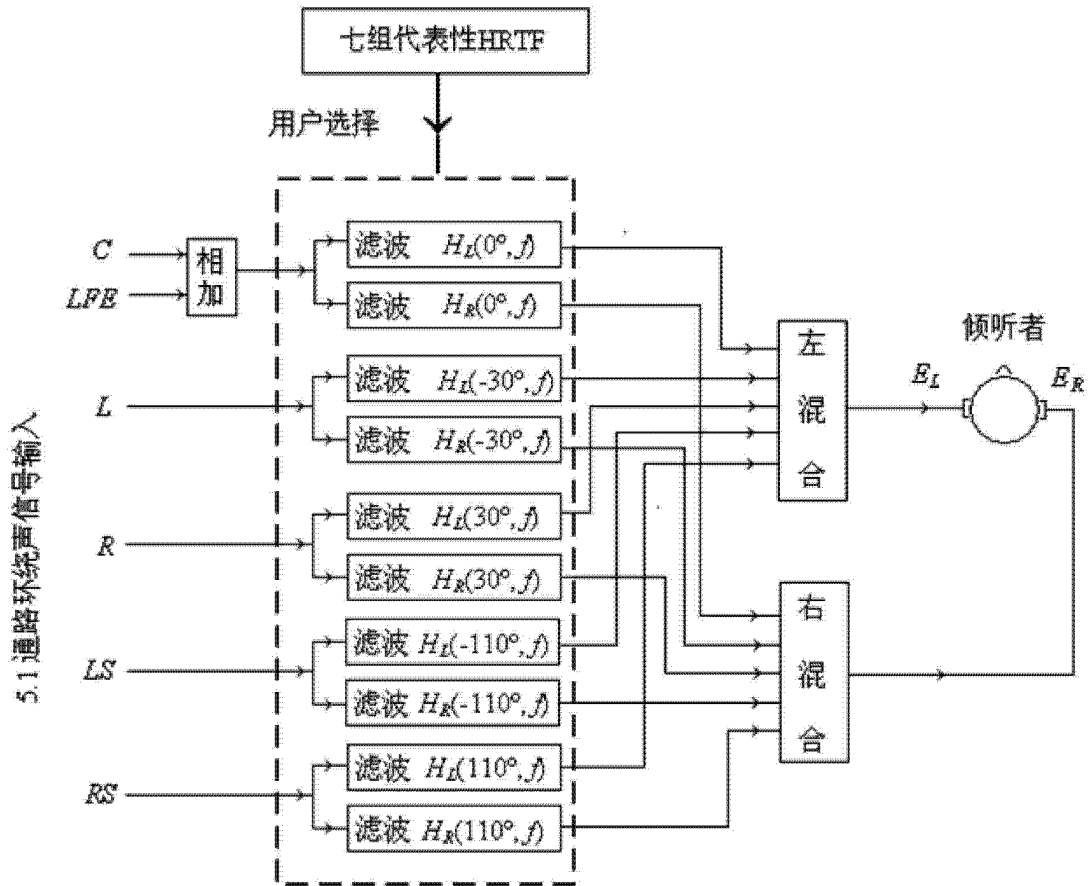


图 4

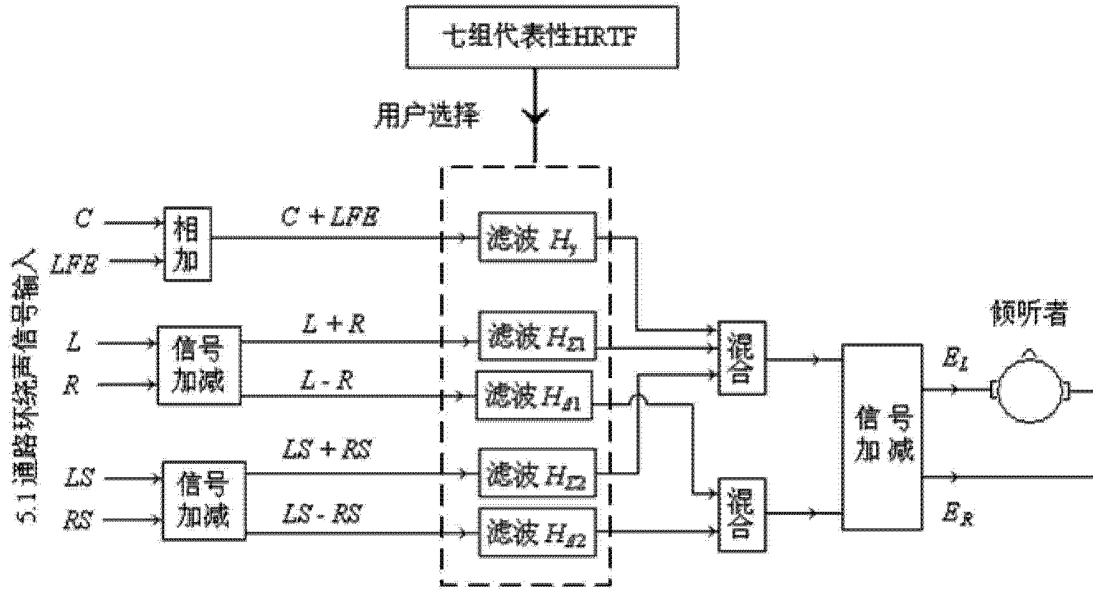
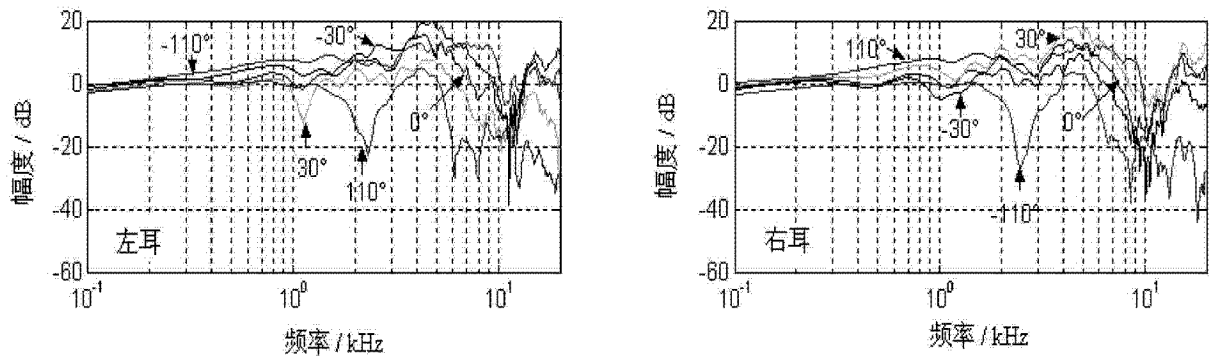
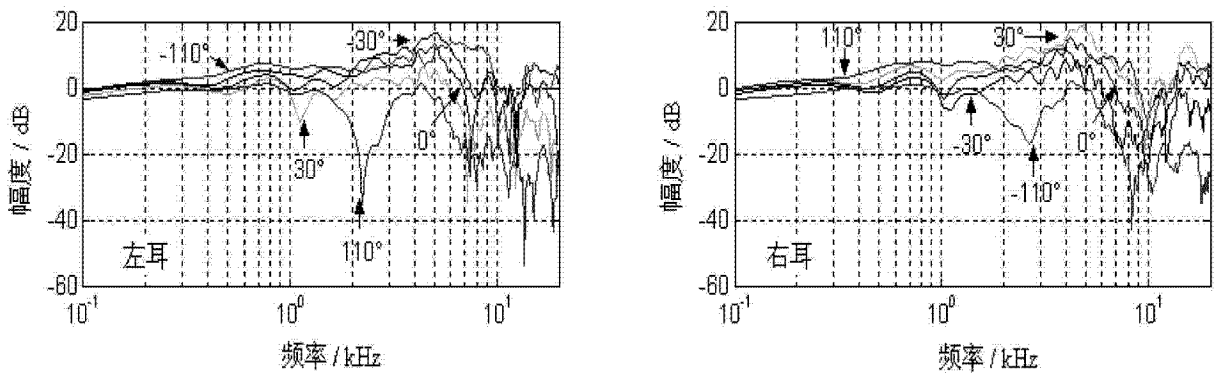


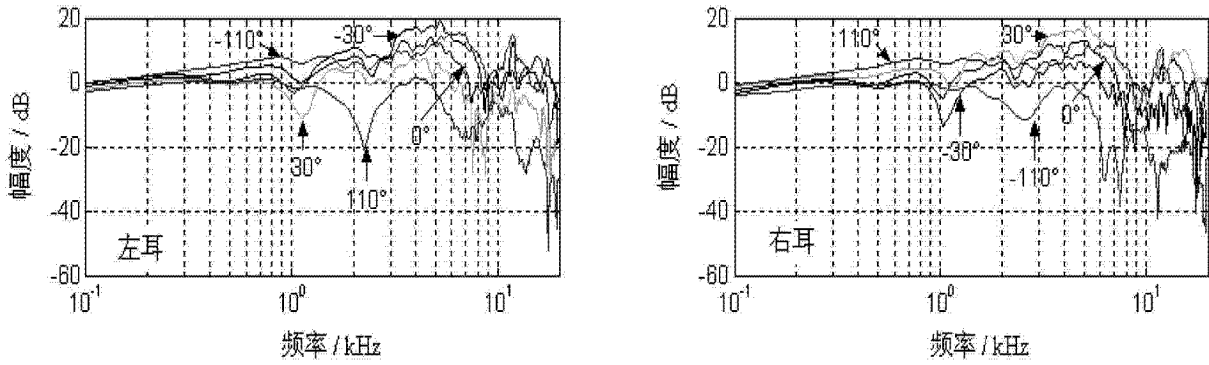
图 5



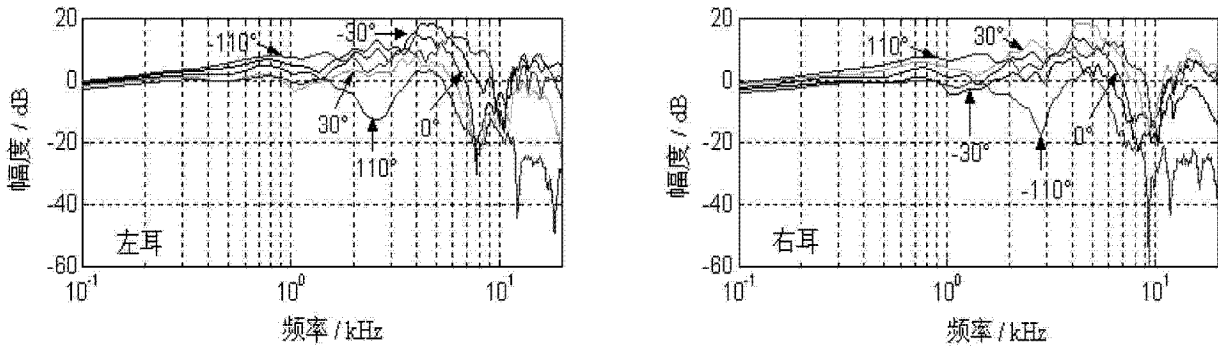
(a) 第一组代表性 HRTF



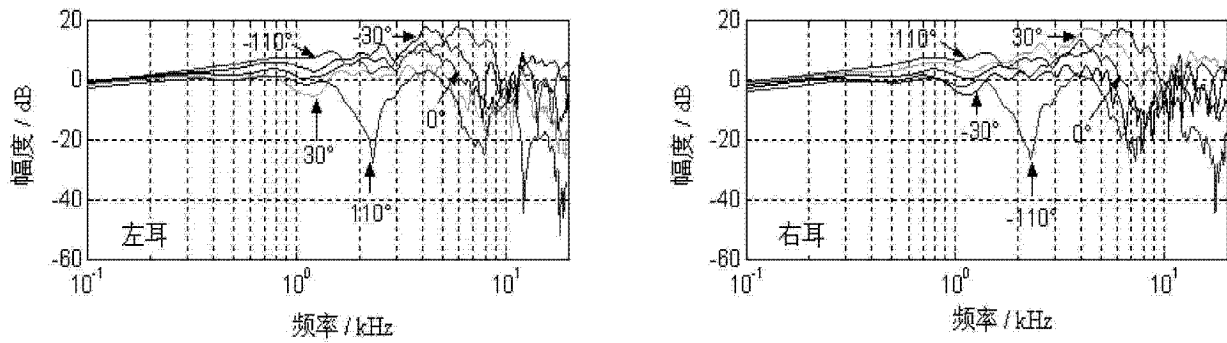
(b) 第二组代表性 HRTF



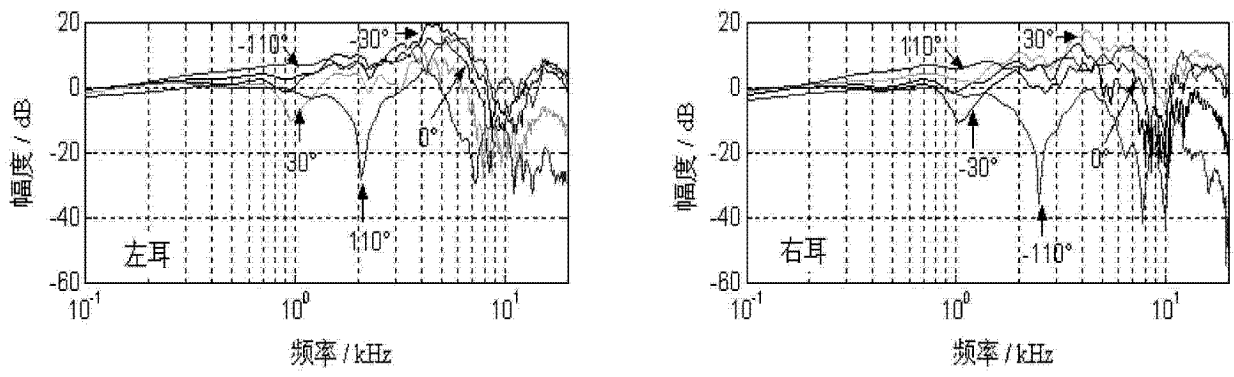
(c) 第三组代表性 HRTF



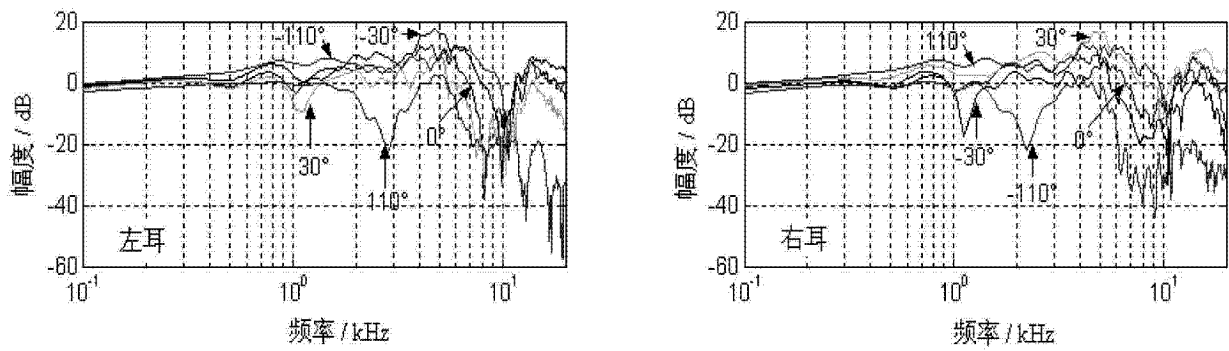
(d) 第四组代表性 HRTF



(e) 第五组代表性 HRTF



(f) 第六组代表性 HRTF



(g) 第七组代表性 HRTF

图 6

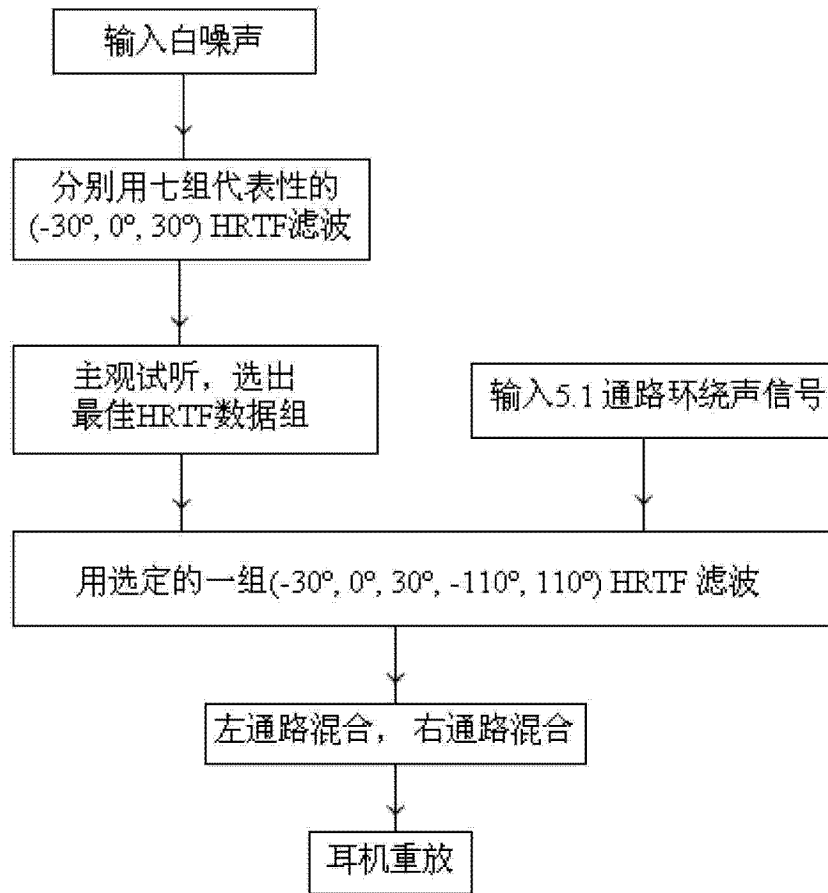


图 7