

# Audio-only 游戏中虚拟声的 HRTF 匹配 与压缩技术研究

孙 青<sup>1</sup>, 马青玉<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学 教育科学学院, 江苏 南京 210097;  
2. 南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

**[摘要]** Audio-only 游戏中, 游戏者的所有操作只能依靠虚拟声所包含的空间信息实现声像定位, 因此对虚拟声的准确性和实时性有较高的要求. 本研究基于 HRTF 的虚拟声基本原理, 比较了 HRTF 的个性化匹配和压缩方法, 并利用 PCA 技术对 CIPIC 和 MIT 实验室的 HRTF 数据进行压缩与重建处理, 实验证明该技术具有计算快速简单和处理效果好的优点, 同时压缩重建前后的 HRTF 数据具有较小误差, 既不影响虚拟声重发的准确性, 又减少了 HRTF 的存储空间, 能有效降低 HRTF 合成的计算复杂度, 提高虚拟声应用的实时性.

**[关键词]** HRTF, PCA, 数据压缩, 个性化匹配

**[中图分类号]** TM912.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011) 01-0062-06

## Study on Individualized Matching and Compression of HRTF for Virtual Sound in Audio-only Games

Sun Qing<sup>1</sup>, Ma Qingyu<sup>2</sup>

(1. School of Education Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;  
2. School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** In Audio-only games, the players can only control the game process and operation based on the orientation information of the sound source in three dimensional virtual sound space, and so real time processing with high accuracy is needed in sound reconstruction. In the paper, based on the basic principle of the HRTF-based three dimensional virtual sounds, the individualized matching and compression method was analyzed and validated through the process progress of the CIPIC and MIT HRTF data using PCA method. The small error between the original and the compress-reconstruct HRTF data proved that the proposed method can be applied in real-time processing system with less storage space and simplified computational complexity to enhance the reconstruction speed and accuracy, which is favorable for the practical application of virtual sound.

**Key words:** HRTF, PCA, compression, individual match

虚拟声(Virtual Sound)是通过对人双耳处的声信号进行拾拾、模拟和重发, 给倾听者在主观感觉上再现现场的主要空间信息, 从而感知声源的空间方位与距离等. 它具有结构较简单、重发的空间听觉真实自然等优点, 因此在多媒体与虚拟现实、计算机游戏、心理声学、家用娱乐等领域有广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>.

头相关传输函数(Head Related Transfer Function, HRTF)描述了头部及耳廓等对声波的散射作用以及由此产生的双耳时间差(Interaural Time Difference, ITD)和声级差(Interaural Level Difference, ILD), 反映了声波从声源到双耳的传输过程<sup>[3]</sup>. 人的听觉系统利用 ITD 和过去的听觉经验相比较, 实现声源的精确定位. 基于 HRTF 的虚拟声通过信号处理的方法, 实现声音空间信息的模拟和重发, 从而给倾听者再现声音的空间主观感觉.

收稿日期: 2010-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金(10974098)、江苏省科技厅自然科学基金(BK2009407)和教育部博士点基金(20093207120003).

通讯联系人: 马青玉, 博士, 副教授, 研究方向: 声学技术和生物医学电子技术. E-mail: maqingyu@njnu.edu.cn

目前,一些计算机游戏已将听觉和视觉相结合,游戏者通过自身所处位置和视觉定位以及声音定位来分析周围的声环境,为游戏的虚拟世界营造更为真实的场景和气氛,增强游戏的临场感. 在一个游戏场景中一般会有十几个声源,分别演绎背景音乐、特效细节(风声、雨声等)、角色音效(嚎叫声、射击声、脚步声等)和环境音效(鸟鸣声、水流声等). 而在针对视障人群的 Audio-only 游戏中,虚拟声更是整个游戏的主体,它不同于普通的计算机游戏,没有视觉感知的帮助,所有操作只能依赖于虚拟声所包含的空间信息来实现声像的定位. 因此,Audio-only 游戏中的虚拟声对声信号处理和声音重发的实时性和准确性提出了更高的要求.

在虚拟声中重建中,不同人具有不同的 HRTF,庞大的 HRTF 数据量要和声音信号相结合,才能重建出包含声源信息的虚拟声信号. 为保证虚拟声重发质量而提高 HRTF 采样频率,会增大运算数据量,其信号处理的计算量呈几何级数上升,这会影响虚拟声重发的实时性;此外,HRTF 函数与人的头部等尺寸有关,不同的人 HRTF 会有差别,因此虚拟声的重发效果是因人而异的,特别是对侧向声像效果的影响更为明显<sup>[4]</sup>. 所以当 HRTF 不匹配时,用耳机重发的虚拟声经常会出现声像混乱和错位,严重影响虚拟声的使用效果. 针对以上问题,需对 HRTF 进行处理,分别进行数据压缩和个性化匹配,以改善 Audio-only 游戏中虚拟声重发的效果.

本文研究了基于 HRTF 的虚拟声基本原理,比较了 HRTF 的个性化匹配和压缩方法,并分别以 CIPIC 和 MIT 实验室的 HRTF 数据为例,采用主成分分解算法(Principal Component Analysis, PCA)进行数据压缩,并将压缩后重建的 HRTF 数据与压缩前 HRTF 数据进行比对,通过实验表明该算法具有重建准确性高、压缩率大、存储空间小、还原精度高、计算速度快的优点,为虚拟声的实时应用提出可行的方法.

## 1 Audio-only 游戏中的 HRTF 虚拟声模型

### 1.1 任意方位 HRTF 数据的实时获取

在游戏中,需要实时获取游戏者头部所在方位的 HRTF 信息来进行信号处理而实现虚拟声的重发,才能产生良好的声像效果. 但如果存储所有连续方位的 HRTF 数据,则数据存储量和数据处理量将非常巨大,限制了虚拟声的实时性和应用性. 在实际应用中,只需使用间隔方位的 HRTF 离散数据,游戏信号处理中可根据周围若干已知方位的 HRTF 数据,通过插值法实时计算出目标方位的近似 HRTF.

图 1 给出了 Audio-only 游戏中的 HRTF 模型,先通过头戴式追踪器给游戏者所在位置进行空间定位,设为坐标原点传送给系统;然后将游戏者应该听到的声源设为目标方位,利用目标方位周围已知 4 个方位的 HRTF 进行插值计算,得到目标方位的 HRTF;最后将目标方位的 HRTF 与需呈现的音频信号进行卷积得到左右两耳的频域信号,经逆变换后即可重发.

在实际的计算中有多种不同的插值函数,其中相邻线性插值函数最为简单常用,表达式为:

$$H(\theta, f) \approx A_{k+1}H(\theta_{k+1}, f) + A_kH(\theta_k, f), \quad \theta_k < \theta < \theta_{k+1}. \quad (1)$$

式中,  $H(\theta, f)$  表示为目标方位  $\theta$  处的 HRTF;  $A_{k+1} = \frac{\theta - \theta_k}{\theta_{k+1} - \theta_k}$ ;

$A_k = 1 - \frac{\theta - \theta_k}{\theta_{k+1} - \theta_k}$ . 当  $\theta_k$  与  $\theta_{k+1}$  之间的差别越小,  $H$  随  $\theta$  的变化率越低,插值的准确率越高<sup>[5]</sup>.

在信号重发中,将目标方位所需呈现的声源作为输入信号,分别与左、右耳 HRTF 进行时域卷积,可以在频域进行相乘计算:

$$\begin{aligned} E_L(\omega) &= H_L E_0, \\ E_R(\omega) &= H_R E_0. \end{aligned} \quad (2)$$

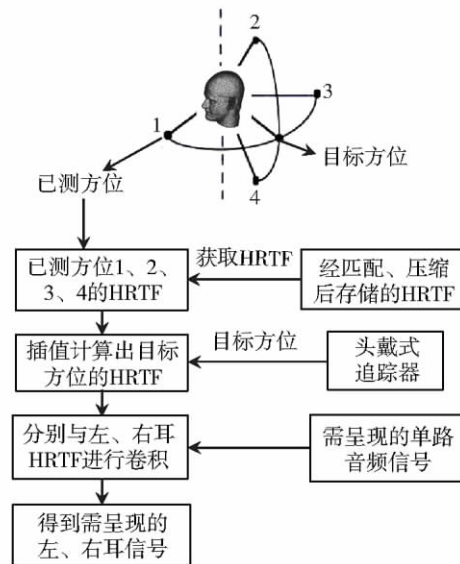


图 1 Audio-only 游戏中 HRTF 模型

Fig.1 HRTF processing flow chart in Audio-only games

式中,  $E_0$  为需输入的单路音频信号;  $H_L$  和  $H_R$  分别为目标方位的左、右耳的 HRTF 函数;  $E_L(t)$  和  $E_R(t)$ 、 $E_L(\omega)$  和  $E_R(\omega)$  分别是左右耳的重发信号和它们的频域信号. 游戏者即可通过倾听  $E_L(t)$  和  $E_R(t)$  的重发信号而感知到目标声源的方位, 从而实现导向和定位.

1.2 虚拟声的实时性和准确性

基于 HRTF 的虚拟声声像定位的准确性取决于所选择的 HRTF 数据是否与倾听者匹配, 使用匹配的 HRTF 时能提高 20% ~ 30% 的定位效果; 同时 HRTF 的庞大数据量( 数据量 = 频率采样点数  $\times$  空间测量方向数  $\times 2$  ), 对虚拟声实时重发过程中的某方向的 HRTF 实时获取、插值计算都不方便, 因而有必要对 HRTF 数据进行个性化匹配和数据压缩.

目前, 对于 HRTF 的个性化匹配, 主要有以下几种: ( 1 ) 数值建模法. 主要有边界元法( Boundary Element Method, BEM ) 和无限-有限元法( Infinite-finite Element Method, IFEM )<sup>[6]</sup>, 但该方法匹配过程计算量大; ( 2 ) 数据库匹配法<sup>[7]</sup>. 该方法利用实验室测量的 HRTF 数据库, 将收听者的生理尺寸和测量者的尺寸进行比较, 选取最接近收听者生理尺寸的 HRTF 进行虚拟重发, 通过改变 HRTF 的频域标度可以实现 HRTF<sup>[8]</sup> 的个性化, 通过对标准 HRTF 进行频率尺度变换可以提高非个人化 HRTF 的定位性能. 数据库匹配法虽然考虑了特征参数的个体化差异, 但是仅用有限参数做匹配; 同时对于改变 HRTF 的频域标度, 不同的听者除了尺度上, 在形状上也会存在差异, 因而频域标度的方法也有一定的局限性.

基函数线性分解是压缩 HRTF 数据的有效方法, 分为两大类: ( 1 ) HRTF 的空间基函数线性分解. 如钟小丽等提出的空间傅里叶分解与重构<sup>[9]</sup>、Evans 等提出的空间球谐函数分解与重构<sup>[10]</sup>等, 可以从离散空间方向的测量数据中得到空间方向上连续的 HRTF 函数, 但通常该类方法的数据压缩率低且数据量大<sup>[11]</sup>; ( 2 ) HRTF 的谱形状基函数线性分解. 主成分分析法( Principal Component Analysis, PCA ) 是其中非常重要和常用的一种计算方法<sup>[11]</sup>, 虽然只能直接重构空间方向上离散的 HRTF 数据, 但压缩率高且数据量和计算量少, 其效果将在本文得到实验验证.

1.3 HRTF 的个性化匹配

在实际应用中, 由于不同倾听者的 HRTF 数据差别可能非常大, 不可能为每个倾听者测量 HRTF 数据, 而使用他人的 HRTF 数据将会造成虚拟声定位效果的下降, 因此需对 HRTF 数据进行相应处理从而达到个性化匹配. 最常用的 HRTF 个性化匹配方法是一种数据库匹配<sup>[12]</sup>, 该方法先进行实验室测量建立 HRTF 数据库, 包括每个被测者相应的头肩外耳参数数据; 然后将收听者的生理尺寸和测量者的尺寸进行比较, 选取最接近收听者生理尺寸的 HRTF 进行虚拟重发. 该方法一般采用生理特征数据与最大 ITD 相关的数据库匹配原则进行匹配<sup>[7]</sup>, 计算每个实验者的最大 ITD 和生理结构的相关性, 即将每组实验获得的最大的 ITD 分别与生理特征值作相关系数计算, 公式为:

$$\gamma_{\xi\eta} = E\left(\frac{\xi - E\xi}{\sigma_\xi} \times \frac{\eta - E\eta}{\sigma_\eta}\right) = \frac{E[(\xi - E\xi)(\eta - E\eta)]}{\sigma_\xi\sigma_\eta}, \tag{3}$$

式中,  $\sigma_\xi$  表示最大 ITD 的方差;  $\sigma_\eta$  分别表示头部宽度、颈部宽度、肩部宽度、耳廓高度和耳廓宽度的方差. 经过对 CIPIC 实验室 HRTF 数据的分析, 得到如表 1 所示的头部不同部位的相关性系数<sup>[12]</sup>. 表 1 中的数据虽然是针对外国人的测量结果, 但其某些生理特征相关性与表 2 所示的针对中国人所测出的生理特征相关性<sup>[13]</sup> 结果相近, 由于表 2 中并未测量耳廓与肩的相关度, 因此本研究目前还是使用表 1 中的数据分析.

假设听者实际生理尺寸为  $d'_i$ , HRTF 对应的标准值为  $d_i$ , 先对其求差值  $e_i^2 = (d'_i - d_i)^2$ , 然后, 对每一个生理特征的差值以相关性为权重进行求和, 其值最小的一个即是匹配的 HRTF 数据.

表 1 最大 ITD 与各个生理特征量的相关性( CIPIC )

Table 1 Correlation coefficient between maximal ITD and physiological bodies ( CIPIC )

	头部宽度	颈部宽度	肩部宽度	耳廓高度	耳廓宽度
$\gamma$	0. 73	0. 73	0. 71	0. 58	0. 28

表 2 最大 ITD 与各个生理特征量的相关性( 中国 )

Table 2 Correlation coefficient between maximal ITD and physiological bodies( China )

	头全高	最大头宽	两耳屏间宽	头深
$\gamma$	0. 580	0. 741	0. 748	0. 435

## 1.4 HRTF 的 PCA 数据压缩

在 PCA 数据压缩方法中,首先需要将数据库中的 HRIR (Head Related Impulse Response) 数据进行离散傅里叶变换,获得 HRTF,然后取 HRTF 的幅值进行 PCA 分析.

考虑到两耳的感知定位作用要优于单耳,将每一方位左右耳的 HRTF 幅度谱顺次连接为一个整体向量作为相应方位的双耳 HRTF,即:

$$\mathbf{H}_i = [\mathbf{H}_{L,i} \quad \mathbf{H}_{R,i}]^T, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

其中,  $N$  为总的方位数,  $\mathbf{H}_{L,i}$  和  $\mathbf{H}_{R,i}$  分别为第  $i$  个方位的左、右耳 HRTF 幅度谱.

对式(4) 计算双耳 HRTF 的自协方差矩阵的特征值  $\lambda_j$  和特征向量  $\mathbf{q}_j$ ,选取其中最大的  $M$  个特征值所对应的特征向量作为正交变换矩阵  $\mathbf{Q} = [\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_M]$ ,  $M$  即主元素的个数. 由正交变换矩阵可求得正交变换系数用权向量  $\mathbf{C}_i = [c_{1i}, c_{2i}, \dots, c_{Mi}]^T$ ,它体现了 HRTF 的空间特征. 权向量可由式(5) 求得:

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{Q}^T (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_{\text{average}}), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{H}_i$  为式(4) 中的第  $i$  个方位的双耳 HRTF,  $\mathbf{H}_{\text{average}}$  为式(4) 中双耳 HRTF 的平均分量. 经过以上处理后, HRTF 数据即可压缩为矩阵  $\mathbf{Q}$  和权向量  $\mathbf{C}_i$ ,而通过下式即可重建 HRTF 数据:

$$\mathbf{H}'_i = \mathbf{Q}\mathbf{C}_i + \mathbf{H}_{\text{average}} = \sum_{j=1}^M c_{ji} \mathbf{q}_j + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

## 2 实验测量和分析

本研究基于 PCA 分解技术,对 CIPIC 和 MIT 的 HRTF 数据库进行了压缩和重建的实验研究,其中 CIPIC 数据库有  $25 \times 50 \times 200 \times 2$  个数据,包含了从  $-80^\circ$  至  $80^\circ$  间 25 个水平方位和  $-45^\circ$  至  $230.625^\circ$  间的 50 个垂直方位,每个 HRTF 有 200 个采样点; MIT 数据库有  $72 \times 14 \times 512 \times 2$  个数据,在水平位置每间隔  $5^\circ$ ,每个 HRTF 有 512 个采样点. 为了简化计算过程,只选择垂直方位为  $0^\circ$  的 HRTF 进行 PCA 压缩,且主分量数目选择为 10. 为了比较重建 HRTF 与原始 HRTF 的差别,通过计算两个频谱信号的误差来判别,其计算公式如下:

$$\text{Error} = \frac{1}{P \times N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^P |\mathbf{H}'_{ij} - \mathbf{H}_{ij}|, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{H}'_{ij}$  为压缩重建后在第  $j$  个方位、第  $i$  个采样点的 HRTF 幅度谱数据,  $\mathbf{H}_{ij}$  为原始 HRTF 在第  $j$  个方位、第  $i$  个采样点的幅度谱数据,  $N$  为方位数,  $P$  为 HRTF 的采样点数.

图 2 分别为 CIPIC 和 MIT 数据库在水平方位  $0^\circ$  的实验频响图,可见重建后的 HRTF 与原始 HRTF 相似,具有基本一致的频响分布. CIPIC 数据计算的差值为 0.037 4, MIT 数据计算的差值为 0.032 5,可见经 PCA 压缩与重建后,不影响 HRTF 数据的使用效果. 而在 PCA 压缩后, MIT 数据只需存储  $1024 \times 10 + 10 \times 72 + 1024 \times 1 = 11\,984$  个数据,而原数据大小为  $1024 \times 72 = 73\,728$ ,压缩比为 16.2%; CIPIC 数据只需存储  $400 \times 10 + 10 \times 25 + 400 \times 1 = 4\,650$  个数据,原数据大小为  $400 \times 25 = 10\,000$ ,压缩比为 46.5%. 可以看出 HRTF 的采样点数越大,压缩效果越明显.

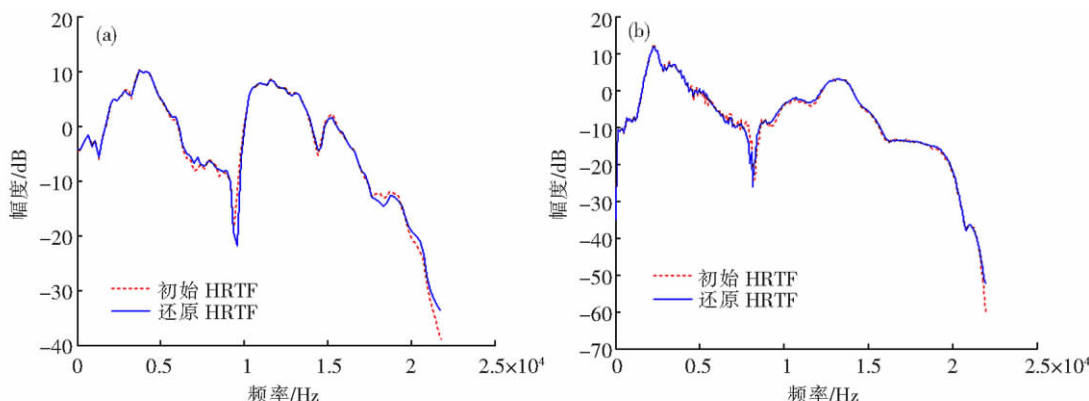


图 2 CIPIC (a) 和 MIT (b) 数据在垂直方位  $0^\circ$  水平方位  $0^\circ$  时左耳的 HRTF 幅频响应

Fig.2 Amplitude-frequency response of left HRTF data at vertical  $0^\circ$  and horizontal  $0^\circ$  for CIPIC (a) and MIT (b) data

此外,由于左右耳的 HRTF 数据的差异性,左右两侧的重建效果也是不一致的. 如图 3 和 4 所示 CIPIC 数据库的重建结果可知,左耳 HRTF 经重建后误差在左侧方位比右侧方位小; 相对地,右耳的 HRTF 重建后误差在右侧方位较小. 同样 HRTF 重建的不一致性在 MIT 数据实验中也得到验证. 图 5 显示了 MIT 数据库的左、右两耳 HRTF 在垂直方位  $0^{\circ}$  时的误差随水平方位角从  $0^{\circ}$  (正前方) 到  $355^{\circ}$  的变化曲线图,可见左耳 HRTF 重建后右前侧 ( $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ) 的误差比左前侧 ( $270^{\circ} \sim 355^{\circ}$ ) 的普遍高,而右耳 HRTF 重建后右前侧的误差比左前侧的普遍低. 但是,重建误差可以控制在一定的范围之内,不影响 HRTF 的总体重建效果,图 5 中的最大误差也仅为 0.06,总体处在一个很低的误差水平,且误差较大的方位角都为后侧方,是人耳听觉感知较为薄弱的方位角,对虚拟声的重放效果不会产生大的影响. 在实验中,因为人耳后侧的 HRTF 会受到耳廓、肩部等部位衍射的影响,因此会在后侧方位产生较大的误差.

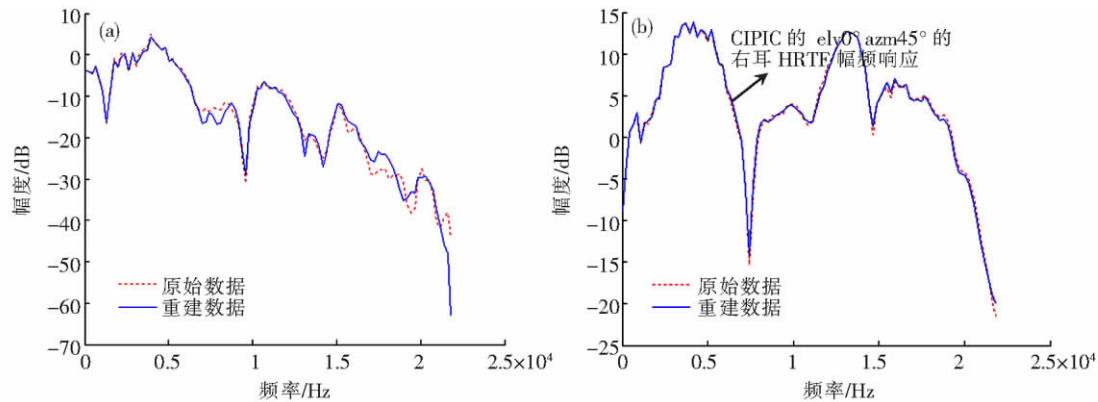


图 3 CIPIC 实验在垂直方位  $0^{\circ}$  水平方位  $45^{\circ}$  时左耳(a)和右耳(b)的 HRTF 的幅频响应

Fig.3 Amplitude–frequency response of left (a) and right (b) HRTF data at vertical  $0^{\circ}$  and horizontal  $45^{\circ}$  for CIPIC data

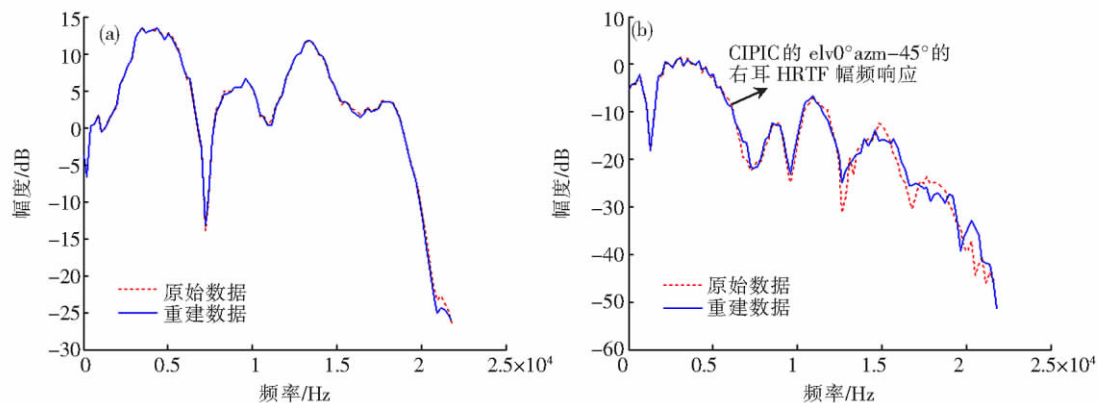


图 4 CIPIC 实验在垂直方位  $0^{\circ}$  和水平方位  $-45^{\circ}$  时左耳(a)和右耳(b)的 HRTF 幅频响应

Fig.4 Amplitude–frequency response of left (a) and right (b) HRTF at vertical  $0^{\circ}$  and horizontal  $-45^{\circ}$  for CIPIC data

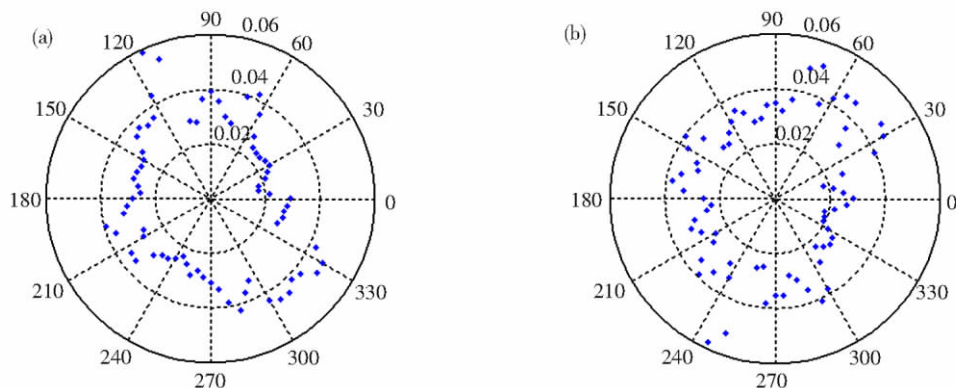


图 5 MIT 实验在垂直方位  $0^{\circ}$  时左右耳 HRTF 重建的全方位角误差

Fig.5 Azimuthal error of the reconstructed left (a) and right (b) HRTF at vertical  $0^{\circ}$  for MIT data



### 3 结论

本文研究了 Audio-only 游戏中 HRTF 的个性化匹配与压缩的原理和算法. 通过对 CIPIC 和 MIT 实验数据进行 PCA 压缩和重建, 分析了不同位置的重建频响特性, 对比左右耳信号的重建误差, 表明 PCA 分解具有良好的压缩效果, HRTF 压缩后重建与原始数据总体相差不大, 误差较大的方位角分布在人耳听觉感知相对薄弱的方位, 不会影响虚拟声重发的准确性, 且其压缩效果与原始 HRTF 数据的采样点数相关, 采样点越多, 其压缩率越高. 其计算快速方便, 有效地压缩了 HRTF 数据, 减少了 HRTF 的存储空间, 且能减少实时合成目标方位 HRTF 的计算复杂度, 有利于满足实时性的要求.

### [参考文献](References)

- [1] 谢波菽, 管善群. 虚拟声技术及其应用[J]. 应用声学, 2004, 23(4): 43-47.  
Xie Boxun, Guan Shanqun. Virtual sound and its application[J]. Applied Acoustics, 2004, 23(4): 43-47. (in Chinese)
- [2] 张永皋, 马青玉, 孙青. 基于 MFCC 和 CHMM 技术的语音情感分析及其在教育中的应用研究[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2009, 9(2): 89-92.  
Zhang Yonggao, Ma Qingyu, Sun Qing. Investigation on speech emotion analyses and its application in education based on MFCC and CHMM techniques[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2009, 9(2): 89-92. (in Chinese)
- [3] 张新红. 头相关函数时域建模仿真研究[J]. 丽水学院学报, 2009, 31(2): 65-68.  
Zhang Xinhong. A simulation research on head related transfer function's model in time domain[J]. Journal of Lishui University, 2009, 31(2): 65-68. (in Chinese)
- [4] 张璐. 用 HRTF 实现 3D 声场报警系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学通信与信息工程学院, 2007.  
Zhang Lu. Research on 3-dimension sound alarm system using HRTF[D]. Chengdu: School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [5] 谢波菽. 头相关传输函数空间采样——插值与环绕声重放[J]. 声学学报, 2007, 32(1): 77-82.  
Xie Boxun. Spatial sample, interpolation for HRTF and signal mixing for multichannel surround sound[J]. ACTA Acoustica, 2007, 32(1): 77-82. (in Chinese)
- [6] Kahana Y. Boundary element simulation of HRTFs and sound field produced by virtual acoustic imaging system[C]// 105 AES Convention. San Francisco, 1998.
- [7] Zotkin D N, Ramani D, Larry D, et al. Virtual audio system customization using visual matching of ear parameters[C]// Proceedings of IEEE 16th International Conference on Pattern Recognition. Quebec, 2002.
- [8] Middlebrooks J C. Individual difference in external ear transfer functions reduced by sealing in frequency[J]. Acoust Soc Am, 1999, 106(3): 1480-1492.
- [9] Zhong Xiaoli, Xie Boxun. Spatial characteristics of head-related transfer function[J]. Chin Phys Lett, 2005, 22(5): 1166-1169.
- [10] Evans M J, Angus J A S, Tew A I. Analyzing head-related transfer function measurements using surface spherical harmonics[J]. J Acoust Soc Am, 1998, 104(4): 2400-2411.
- [11] 张婷婷, 谢波菽. HRTF 的主成分分析与空间傅里叶重构[J]. 电声技术, 2008, 8(32): 48-56.  
Zhang Tingting, Xie Bosun. Principal component analysis and spatial Fourier reconstruction of head-related transfer functions[J]. Audio Engineering, 2008, 8(32): 48-56. (in Chinese)
- [12] 周蕙瑜. 双通道立体声的虚拟重放技术研究[D]. 成都: 电子科技大学通信与信息工程学院, 2006.  
Zhou Huiyu. Research on virtual reproduction of binaural sound[D]. Chengdu: School of Communication and Information Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [13] 谢波菽, 钟小丽, 饶丹, 等. 头相关传输函数数据库及其特性分析[J]. 中国科学 G 辑: 物理学, 力学, 天文学, 2006, 36(5): 464-479.  
Xie Bosun, Zhong Xiaoli, Rao Dan, et al. Analyzing characteristics of head-related transfer function database[J]. Science in China Ser G: Physics, Mechanics & Astronomy, 2006, 36(5): 464-479. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]