

一种非中心点处声场重建方法

王松 张聪

(武汉轻工大学数学与计算机学院 湖北 武汉 430048)

摘要 针对已有技术使用若干扬声器合成一个虚拟声源的方法在中心听音点处的三位声场重建效果较好,而非中心听音点处的声场重建效果较差的问题,提出一种非中心点处三维声场重建方法。以非中心点为中心构建虚拟扬声器阵列,并求解虚拟扬声器的信号;由虚拟扬声器的信号求得实际扬声器的信号。模拟实验将该方法应用于 NHK22.2 系统的重建,结果表明,该方法在非中心听音点处的三维声场重建效果优于传统方法。

关键词 非中心点 三维声场重建

中图分类号 TP391 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.12.016

A METHOD FOR SOUND FIELD RECONSTRUCTION AT NON-CENTRAL POINT

Wang Song Zhang Cong

(School of Mathematics and Computer Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, Hubei, China)

Abstract The existing method of synthesizing a virtual sound source with several loudspeakers has better 3D sound field reconstruction effect at the central listening point, but the 3D sound field reconstruction effect at the non-central listening point is poor. Aiming at this problem, this paper proposes a non-central listening point 3D sound field reconstruction method. The virtual sphere was constructed with the non-center point as the center of the sphere, and the signals of the virtual loudspeakers were solved. The signals of real loudspeakers were obtained by the signals of virtual loudspeakers. The simulation experiment applied this method to the reconstruction of NHK22.2 system, and the results show that the proposed method is superior to traditional methods in 3D sound field reconstruction effect at non-central listening point.

Keywords Non-central point 3D sound field reconstruction

0 引言

随着首部 3D 电影的热播,3D 影视技术受到大家的热捧,截至 2017 年,我国 3D 影院基本达到全覆盖。随着 3D 影音技术的飞速发展,3D 音频技术已经成为多媒体领域的研究热点。当前三维音频技术包括 Ambisonics^[1-5],波场合成(Wave Field Synthesis, WFS)^[6-10],头相关传输函数(Head Related Transfer Function, HRTF)^[11-14],矢量基幅度平移(Vector Based Amplitude Panning, VBAP)^[15-16]等。其中,VBAP 是一种重

要的三维音频技术。

VBAP 利用向量的观点,使用两个或三个扬声器合成一个虚拟声源,以达到声音定位的目的。在三维 VBAP 中,虚拟声源通过三个扬声器利用向量合成的原则合成虚拟声源^[15-16]。VBAP 具有计算效率和声像重建精度较高的优点。相较于 Ambisonics,VBAP 中的扬声器可以自由摆放,不必均匀摆放;相较于 WFS,VBAP 使用扬声器的数目较少,应用成本较低;相较于利用 HRTF 的三维定位方法,VBAP 的计算效率较高。

2009 年,Ando 等^[17]提出一种基于声压向量的三维平移方法,其核心思想是:虚拟声源在接收点处产生

的声压向量与三个扬声器在接收点处产生的声压向量相等。该方法要求虚拟声源对应向量的方向位于三个扬声器构成球面三角形的内部。当三个扬声器和虚拟声源位于同一球面时,该方法得到的结果与 VBAP 的结果一样。

2011 年,Ando^[18]提出了一种基于声压和质点速度的三维平移方法。该方法使用三个扬声器合成一个虚拟声源,三个扬声器和虚拟声源位于同一个球面上,合成的原则是虚拟声源在接收点处产生的声压和质点速度的方向与三个扬声器在接收点处产生的声压和质点速度的方向相等,从而计算得到三个扬声器的分配系数。该方法为 VBAP 提供了物理基础。

2013 年至 2014 年间,针对扬声器数目多于三个时扬声器需要分组的问题,文献[19-20]提出一次使用五个或者四个扬声器合成一个虚拟声源的方法,进一步推广了 VBAP 技术。

文献[15-20]都是以中心听音点为接收点,所有扬声器与虚拟声源都位于同一球面上,中心听音点处的三维声场重建效果最好。中心听音点被称为“甜点”或者“皇帝位”。其原理都是保证中心听音点处的声音物理性质不变,而忽略了非中心听音点处声音物理性质的保持,导致非中心听音点处声场重建效果较差。在实际应用场景中,听音者也可能处在或者运动到非中心听音点处,因此非中心听音点处三维声场的重建质量的保持具有现实意义。当前已有一些非中心听音点处或非中心区域的三维声场重建技术如同区域压力匹配技术^[21](Pressure Matching in a Same Zone, PMSZ)和同区域质点速度匹配技术^[22](Particle Velocity Matching in a Same Zone, PVMSZ)。PMSZ 在原始系统与重建系统的同一区域内部匹配声压,PVMSZ 在原始系统与重建系统的同一区域内部匹配质点速度。从理论上讲,它们均可用于非中心区域声场重建。但是已有一些实验结果表明,在非中心区域声场重建时,PMSZ 与 PVMSZ 的重建误差较大,因此需要研究更好的非中心点或者非中心区域声场重建方法。

针对已有技术存在的问题,本文提出一种将非中心听音点中心化的方法,通过扬声器信号的二次分配在局部范围内使用三个扬声器合成一个虚拟声源,不断重复这一过程实现 10 个扬声器重建原始 22 声道系统,同时提高非中心听音点处重建三维声场的质量。本文主要贡献如下:(1)传统方法重建声场时如 VBAP 和文献[18]方法等,中心听音点处重建效果最好,但非中心听音点处重建效果较差。本文以非中心点为中心,构建虚拟扬声器阵列,通过虚拟扬声器阵列

恢复非中心点处的声场。通过保证虚拟扬声器和实际扬声器在非中心点处产生的质点速度不变,将虚拟扬声器信号转换成实际扬声器信号,最终通过实际扬声器信号重建非中心点处的声场。(2)实现了利用 10 声道系统在非中心点处重建原始 22 声道系统的声场。实验结果表明,10 声道系统重建精度较高。

1 声压与质点速度的概念

假设单个扬声器(单个扬声器可视作虚拟声源或者点声源)所在的位置为 $\xi = (\xi_x, \xi_y, \xi_z)^\top$,接收点(也即听音点)所在位置为 $\eta = (x, y, z)^\top$,则单个扬声器在接收点处产生的声压为:

$$p(\eta, \omega) = G \frac{e^{-ik|\eta-\xi|}}{|\eta-\xi|} s(\omega) \quad (1)$$

式中: i 为虚数单位; $k=2\pi f/c$ 为波数; f 为声音信号的频率; c 表示声音的传播速度; $s(\omega)$ 为扬声器输入信号的傅里叶变换; G 表示距离扬声器单位距离处的声压与扬声器信号之间的比例系数。

单个扬声器在接收点处产生的质点速度为:

$$u(\eta, \omega) = G \left(1 + \frac{1}{ik|\eta-\xi|} \right) \frac{e^{-ik|\eta-\xi|}}{|\eta-\xi|^2} \begin{pmatrix} x-\xi_x \\ y-\xi_y \\ z-\xi_z \end{pmatrix} s(\omega) \approx G \frac{e^{-ik|\eta-\xi|}}{|\eta-\xi|^2} \begin{pmatrix} x-\xi_x \\ y-\xi_y \\ z-\xi_z \end{pmatrix} s(\omega) \quad (2)$$

2 文献[18]方法

如图 1 所示,假设一个虚拟声源和三个扬声器位于同一个球面上,虚拟声源位于三个扬声器构成球面三角形的内部,接收点位于中心点 $O(0,0,0)$ 处。虚拟声源的坐标为 $v_s(v_{sx}, v_{sy}, v_{sz})$,三个扬声器的坐标为 $\xi_1 = (\xi_{1x}, \xi_{1y}, \xi_{1z})^\top$, $\xi_2 = (\xi_{2x}, \xi_{2y}, \xi_{2z})^\top$, $\xi_3 = (\xi_{3x}, \xi_{3y}, \xi_{3z})^\top$,它们的极坐标表示分别为: $(\rho_0, \theta_0, \varphi_0)$ 、 $(\rho_1, \theta_1, \varphi_1)$ 、 $(\rho_2, \theta_2, \varphi_2)$ 、 $(\rho_3, \theta_3, \varphi_3)$ 。

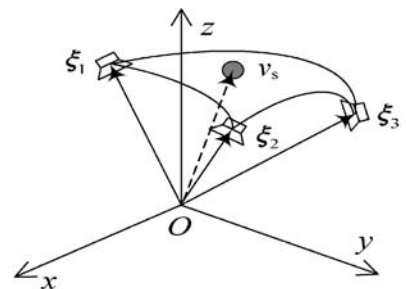


图 1 扬声器摆放、虚拟声源位置图

虚拟声源在接收点处产生的质点速度为:

$$\mathbf{u}_0(\omega) = -\frac{G e^{-ik\rho_0}}{\lambda c \rho_0} \begin{pmatrix} \cos\theta_0 \cos\varphi_0 \\ \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \\ \sin\varphi_0 \end{pmatrix} s(\omega) \quad (3)$$

式中: λ 表示空气密度。虚拟声源在接收点处产生的声压为:

$$p_0(\omega) = G \frac{e^{-ik\rho_0}}{\rho_0} s(\omega) \quad (4)$$

三个扬声器在接收点处产生的质点速度为:

$$\mathbf{u}_{\text{sum}}(\omega) = -\frac{G}{\lambda c} \mathbf{H} \mathbf{W} s(\omega) \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik\rho_1}}{\rho_1} \cos\theta_1 \cos\varphi_1 & \frac{e^{-ik\rho_2}}{\rho_2} \cos\theta_2 \cos\varphi_2 & \frac{e^{-ik\rho_3}}{\rho_3} \cos\theta_3 \cos\varphi_3 \\ \frac{e^{-ik\rho_1}}{\rho_1} \sin\theta_1 \cos\varphi_1 & \frac{e^{-ik\rho_2}}{\rho_2} \sin\theta_2 \cos\varphi_2 & \frac{e^{-ik\rho_3}}{\rho_3} \sin\theta_3 \cos\varphi_3 \\ \frac{e^{-ik\rho_1}}{\rho_1} \sin\varphi_1 & \frac{e^{-ik\rho_2}}{\rho_2} \sin\varphi_2 & \frac{e^{-ik\rho_3}}{\rho_3} \sin\varphi_3 \end{pmatrix}$$

$\mathbf{W} = (w_1, w_2, w_3)^T$ 为三个扬声器的信号分配系数。三个扬声器在接收点处产生的声压为:

$$p_{\text{sum}}(\omega) = G \sum_{m=1}^3 \frac{e^{-ik\rho_m}}{\rho_m} w_m s(\omega) \quad (6)$$

由下式:

$$\begin{cases} u_0(\omega) = \mathbf{u}_{\text{sum}}(\omega) \\ p_0(\omega) = p_{\text{sum}}(\omega) \end{cases} \quad (7)$$

通过近似求解可以得到三个扬声器的分配系数^[21]为:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \frac{\rho_1}{\rho_0} e^{-ik(\rho_0 - \rho_1)} \frac{D_1}{D}, \frac{\rho_2}{\rho_0} e^{-ik(\rho_0 - \rho_2)} \frac{D_2}{D}, \\ \frac{\rho_3}{\rho_0} e^{-ik(\rho_0 - \rho_3)} \frac{D_3}{D} \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

式中:

$$D = D_1 + D_2 + D_3$$

$$D_1 = \sin(\theta_3 - \theta_2) \cos\varphi_3 \cos\varphi_2 \sin\varphi_0 + [\sin(\theta_0 - \theta_3) \cdot \cos\varphi_3 \sin\varphi_2 - \sin(\theta_0 - \theta_2) \cos\varphi_2 \sin\varphi_3] \cos\varphi_0$$

$$D_2 = \sin(\theta_1 - \theta_3) \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 \sin\varphi_0 + [\sin(\theta_0 - \theta_1) \cdot \cos\varphi_1 \sin\varphi_3 - \sin(\theta_0 - \theta_3) \cos\varphi_3 \sin\varphi_1] \cos\varphi_0$$

$$D_3 = \sin(\theta_2 - \theta_1) \cos\varphi_2 \cos\varphi_1 \sin\varphi_0 + [\sin(\theta_0 - \theta_2) \cdot \cos\varphi_2 \sin\varphi_1 - \sin(\theta_0 - \theta_1) \cos\varphi_1 \sin\varphi_2] \cos\varphi_0$$

3 方法设计

本文提出方法的整体流程如图 2 所示。

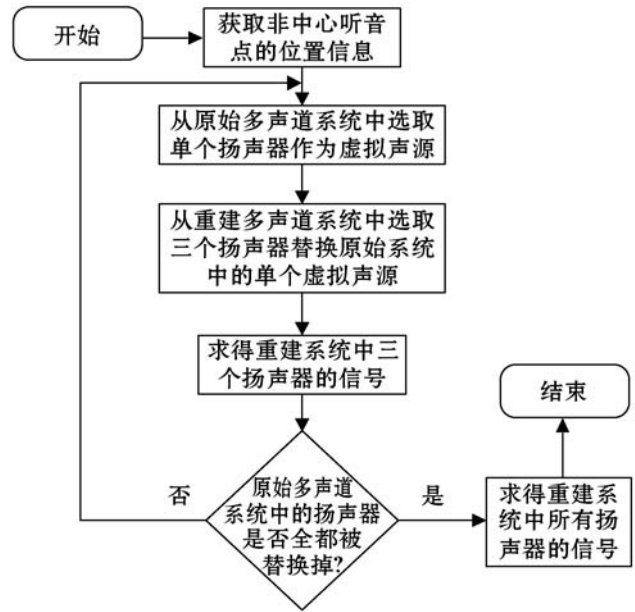


图 2 提出方法整体流程图

本文方法的实际扬声器、虚拟扬声器摆放以及虚拟声源位置图如图 3 所示。点 O 表示直角坐标系的原点, O' 表示非中心点所在位置, 虚拟声源所在位置为点 v_s , 实际扬声器所在位置为点 ξ_1, ξ_2, ξ_3 。虚拟扬声器所在位置为 v_1, v_2, v_3 。假设非中心点位于 $O'(O'_x, O'_y, O'_z)$ 处, 以点 O' 为圆心, 以点 O' 与虚拟声源所在位置 $v_s(v_{sx}, v_{sy}, v_{sz})$ 之间的距离为半径 R_s 构建虚拟球 O' , 其中:

$$R_s = \sqrt{(O'_x - v_{sx})^2 + (O'_y - v_{sy})^2 + (O'_z - v_{sz})^2} \quad (9)$$

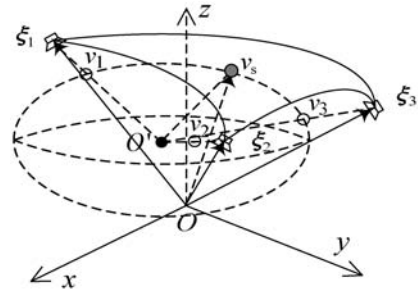


图 3 实际扬声器、虚拟扬声器摆放以及虚拟声源位置图

连接 $O'\xi_1, O'\xi_2, O'\xi_3$, 它们分别与虚拟球 O' 表面相交于点 $v_1(v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}), v_2(v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}), v_3(v_{3x}, v_{3y}, v_{3z})$, 则假设虚拟扬声器位于点 v_1, v_2, v_3 处。

在球体 O' 内部, 当以点 O' 为中心时, v_s 的极坐标为 $(\rho'_0, \theta'_0, \varphi'_0)$, 它的计算公式为:

$$\begin{cases} \rho'_0 = R_s \\ \theta'_0 = \arctan \frac{v_{sy} - O'_y}{v_{sx} - O'_x} \\ \varphi'_0 = \arcsin \frac{v_{sz} - O'_z}{R_s} \end{cases} \quad (10)$$

当以点 O' 为中心时, v_1, v_2, v_3 的极坐标分别为 $(\rho_{e1}, \theta_{e1}, \varphi_{e1}), (\rho_{e2}, \theta_{e2}, \varphi_{e2}), (\rho_{e3}, \theta_{e3}, \varphi_{e3})$, 它们的计

算公式为:

$$\begin{cases} \rho_{vj} = R_s \\ \theta_{vj} = \arctan \frac{\xi_{jy} - O'_y}{\xi_{jx} - O'_x} \quad j = 1, 2, 3 \\ \varphi_{vj} = \arcsin \frac{\xi_{jz} - O'_z}{R_s} \end{cases} \quad (11)$$

在球体 O' 内部,中心点为点 O' ,点 v_1, v_2, v_3 与 v_s 都位于同一个球面上,满足文献[18]方法的使用条件,因此使用文献[18]方法,可以将 v_s 处虚拟声源的信号分配给 v_1, v_2, v_3 处三个虚拟扬声器。假设 v_1, v_2, v_3 处三个虚拟扬声器的信号分配系数分别为 $w^v = (w_1^v, w_2^v, w_3^v)$, 则:

$$\begin{cases} w_1^v = \frac{\rho_{v1}}{\rho'_0} e^{-ik(\rho'_0 - \rho_{v1})} \frac{D'_1}{D'} \\ w_2^v = \frac{\rho_{v2}}{\rho'_0} e^{-ik(\rho'_0 - \rho_{v2})} \frac{D'_2}{D'} \\ w_3^v = \frac{\rho_{v3}}{\rho'_0} e^{-ik(\rho'_0 - \rho_{v3})} \frac{D'_3}{D'} \end{cases}$$

式中:

$$D' = D'_1 + D'_2 + D'_3$$

$$D'_1 = \sin(\theta_{i3} - \theta_{i2}) \cos\varphi_{i3} \cos\varphi_{i2} \sin\varphi'_0 + [\sin(\theta'_0 - \theta_{i3}) \cdot \cos\varphi_{i3} \sin\varphi_{i2} - \sin(\theta'_0 - \theta_{i2}) \cos\varphi_{i2} \sin\varphi_{i3}] \cos\varphi'_0$$

$$D'_2 = \sin(\theta_{v1} - \theta_{i3}) \cos\varphi_{v1} \cos\varphi_{i3} \sin\varphi'_0 + [\sin(\theta'_0 - \theta_{v1}) \cdot \cos\varphi_{v1} \sin\varphi_{i3} - \sin(\theta'_0 - \theta_{i3}) \cos\varphi_{i3} \sin\varphi_{v1}] \cos\varphi'_0$$

$$D'_3 = \sin(\theta_{i2} - \theta_{v1}) \cos\varphi_{i2} \cos\varphi_{v1} \sin\varphi'_0 + [\sin(\theta'_0 - \theta_{i2}) \cdot \cos\varphi_{i2} \sin\varphi_{v1} - \sin(\theta'_0 - \theta_{v1}) \cos\varphi_{v1} \sin\varphi_{i2}] \cos\varphi'_0$$

当以为 O 中心点时, O' 为非中心点,此时点 v_1, v_2, v_3 的直角坐标分别为:

$$\begin{cases} v_{jx} = \rho_{vj} \cos\theta_{vj} \cos\varphi_{vj} + O'_x \\ v_{jy} = \rho_{vj} \sin\theta_{vj} \cos\varphi_{vj} + O'_y \\ v_{jz} = \rho_{vj} \sin\varphi_{vj} + O'_z \end{cases} \quad j = 1, 2, 3 \quad (13)$$

然后利用 v_1, v_2, v_3 处虚拟扬声器信号求解 ξ_1, ξ_2, ξ_3 处实际扬声器信号。当 O 为坐标原点时,点 $v_j (j = 1, 2, 3)$ 处虚拟扬声器在点 O' 处产生的质子速度为:

$$w_j^v(O', \omega) = G \frac{e^{-ik|O' - v_j|}}{|O' - v_j|^2} \begin{pmatrix} O'_x - v_{jx} \\ O'_y - v_{jy} \\ O'_z - v_{jz} \end{pmatrix} w_j^v s(\omega) \quad (14)$$

v_j 处虚拟扬声器对应的 ξ_j 处实际扬声器在点 O' 处产生的质子速度为:

$$w_j^t(O', \omega) = G \frac{e^{-ik|O' - \xi_j|}}{|O' - \xi_j|^2} \begin{pmatrix} O'_x - \xi_{jx} \\ O'_y - \xi_{jy} \\ O'_z - \xi_{jz} \end{pmatrix} w_j^t s(\omega) \quad (15)$$

式中: w_1^t, w_2^t, w_3^t 表示 ξ_1, ξ_2, ξ_3 处三个实际扬声器的信号分配系数。利用:

$$\begin{cases} w_1^v(O', \omega) = w_1^t(O', \omega) \\ w_2^v(O', \omega) = w_2^t(O', \omega) \\ w_3^v(O', \omega) = w_3^t(O', \omega) \end{cases} \quad (16)$$

可以得到:

$$w_j^v = ((F_j^t)^H F_j^t + \lambda I)^{-1} (F_j^t)^H F_j^v \quad (17)$$

$$F_j^t = \frac{e^{-ik|O' - \xi_j|}}{|O' - \xi_j|^2} \begin{pmatrix} O'_x - \xi_{jx} \\ O'_y - \xi_{jy} \\ O'_z - \xi_{jz} \end{pmatrix}$$

$$F_j^v = \frac{e^{-ik|O' - v_j|}}{|O' - v_j|^2} \begin{pmatrix} O'_x - v_{jx} \\ O'_y - v_{jy} \\ O'_z - v_{jz} \end{pmatrix} w_j^v \quad j = 1, 2, 3$$

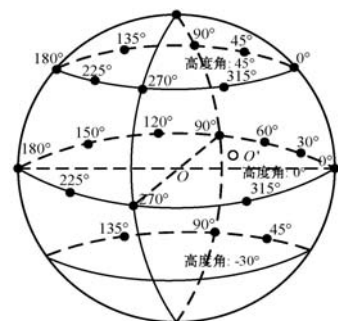
式中: I 为单位矩阵; λ 为规则化因子。

不断重复上述过程,将原始声场中的每个虚拟声源使用重建系统的三个扬声器逐渐全部替换掉,每次求得三个扬声器的分配系数,它们乘以被替换虚拟声源的信号即可求出三个扬声器的信号,最后将重建系统中扬声器的信号进行叠加,得到最终重建系统中扬声器的信号。

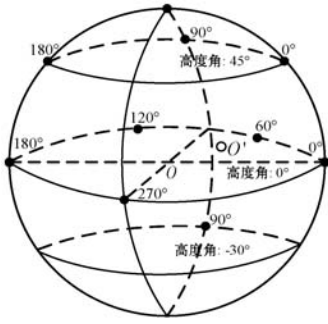
4 仿真实验

4.1 实验结果

本文通过计算机模拟实验比较本文方法和Ando、PMSZ、PVMSZ 传统方法在非中心点处三维声场重建的效果。本文使用 10 声道系统重建 NHK22.2 多声道系统,两个低音效果声道不作处理。原始系统与重建系统的扬声器摆放位置结构图参见图 4,这些扬声器摆放位置都是 NHK 研究人员设计出来用于听音测试的。原始系统与重建系统的扬声器分别位于以坐标原点 $O(0,0,0)$ 为中心,2 m 为半径的球面上,非中心点所在位置为 $O'(0.5,0.5,0)$ (直角坐标表示),黑色实心点表示扬声器所在的位置。声音速度为 340 m/s,人头半径为 0.085 m。仿真实验采用原始声源的信号为 900 Hz 进行实验。



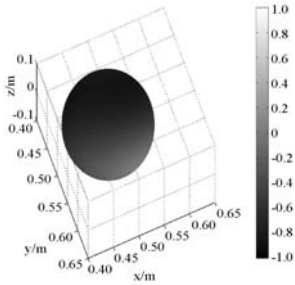
(a) 原始 22 声道系统



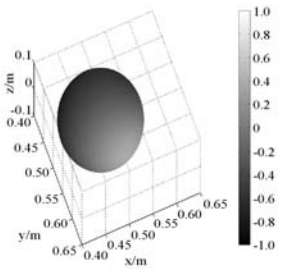
(b) 重建 10 声道系统

图 4 多声道系统扬声器位置摆放图

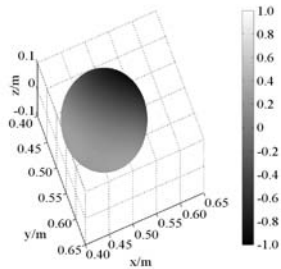
当虚拟声源信号频率 $f = 900 \text{ Hz}$ 时,原始 22 声道系统产生声场与重建 10 声道系统产生声场的对比图如图 5 所示。可以看出,相较于传统方法,本文提出方法在非中心点 O' 周围产生的声场更加接近于原始系统声源在非中心点处产生的声场。



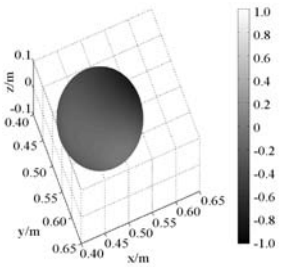
(a) 原始系统产生的声场图



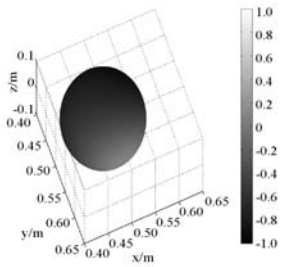
(b) 文献[18]方法



(c) 文献[21]方法



(d) 文献[22]方法



(e) 本文方法

图 5 点 O' 为中心人头半径为半径的球面上声场恢复对比图
相对均方误差 (Relative Mean Square Error, RMSE) 被用来衡量重建声场相对于原始声场的误差大小。它的定义表达式为:

$$RMSE = \frac{\iiint_S |P_o - P_r|^2 dS}{\iiint_S |P_o|^2 dS} \quad (18)$$

式中: S 表示以 O' 为球心的球体; 球体半径为 r ; P_o 表示原始声源在球体 S 内部产生的声压; P_r 表示重建系统中声源在球体 S 内部产生的声压。传统方法和提出方法产生的相对均方误差对比参见图 6。

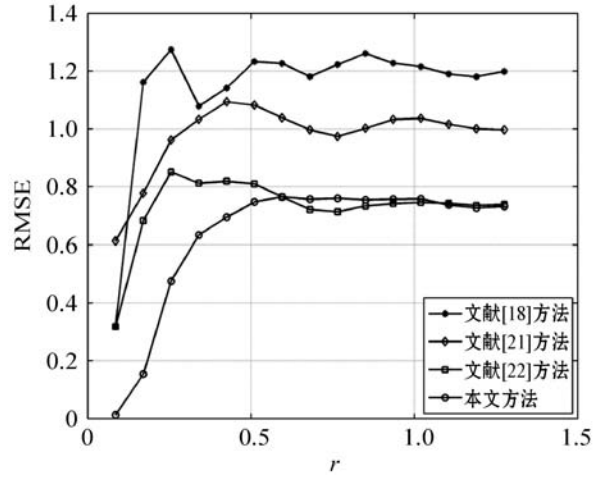


图 6 相对均方误差对比图

可以看出,在以非中心点 O' 为球心的球体内部,当球体半径逐渐增大时,本文方法的相对均方误差整体上是逐渐增大的。在球体半径 r 的所有可能的取值范围内,本文方法产生的相对均方误差比文献[18]和文献[21]方法产生的相对均方误差都低;当球体半径 r 取值范围是 $[0.085, 0.51] \text{ m}$ 和 $[1.105, 1.275] \text{ m}$ 时,本文方法产生的相对均方误差比文献[22]方法低;当球体半径 r 取值范围是 $[0.595, 1.020] \text{ m}$ 时,本文方法产生的相对均方误差比文献[22]方法略高,但是不超过 5%。特别地,当球面半径 $r = 0.085 \text{ m}$ 即人头半径大小时,如表 1 所示。本文方法产生的相对均方误差为 1.27% ($< 4\%$, 可以满足实际应用需求^[23]),比文献[18]、文献[21]和文献[22]方法分别低 30.64、60 和 30.55 个百分点。这表明在单个人头半径内,即一个听音者进行听音时,本文方法显著优于所有传统方法。当球体半径大于 0.51 m 时(即大于 6 个人头半径大小),本文方法产生的相对均方误差仍然低于文献[18]和文献[21]方法,但是与文献[22]方法相差不大。

表 1 当 $r = 0.085 \text{ m}$ 时,相对均方误差比较 %

方法	相对均方误差
文献[18]方法	31.91
文献[21]方法	61.27
文献[22]方法	31.82
本文方法	1.27

时间平均声音强度的定义为:

$$I(O', \omega) = \frac{1}{2} \text{Re}(p(O', \omega)u(O', \omega)^*) \quad (19)$$

式中:“*”表示复共轭;“Re”表示复数的虚部。时间平均声音强度可用于分析声音强度流,它表示一段时间之内的平均瞬时强度。强度流表示时间平均声音强度的方向,其数学表达式为:

$$IF(O', \omega) = \frac{I(O', \omega)}{|I(O', \omega)|} \quad (20)$$

强度流误差的定义为:

$$EIF = \frac{\cos^{-1}(IF_{od}(O', \omega) \cdot IF_{rd}(O', \omega))}{\pi} \times 100\% \quad (21)$$

式中: $IF_{od}(O', \omega)$ 表示原始声场的强度流; $IF_{rd}(O', \omega)$ 表示重建声场的强度流。

不同方法的强度流误差比较如图7所示。黑色圆圈的半径为0.085 m,表示以人头半径为半径的区域。可以看出在黑色圆圈范围内,文献[21]方法产生的强度流误差低于文献[18]方法和文献[22]方法,而本文方法产生的强度流误差低于所有传统方法。

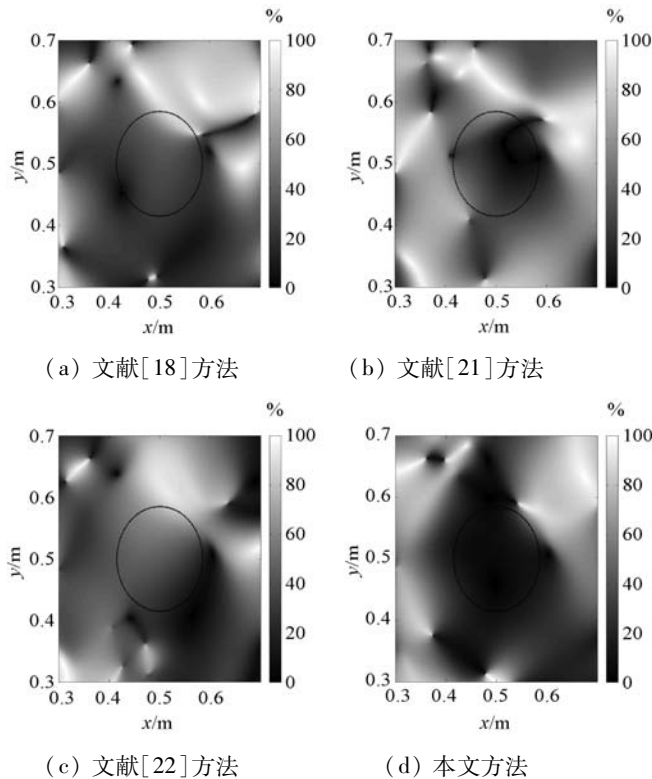


图7 强度流误差比较

在以 $O'(0.5, 0.5, 0)$ 为中心点,人头半径0.085 m为半径的非中心区域内部,当声音信号频率变化范围为 $[50, 900]$ Hz时,不同方法产生的相对均方误差如图8所示。

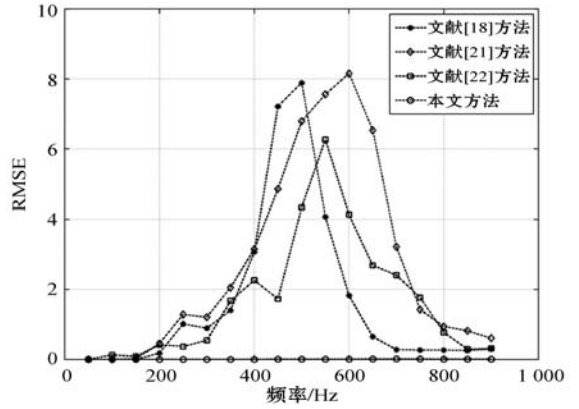


图8 相对均方误差与信号频率之间的关系对比图

可以看出,随着信号频率的变化,本文方法产生的相对均方误差最低,其变化范围是 $[0, 1.77\%]$;而文献[18]方法产生的相对均方误差变化范围是 $[0, 789.28\%]$,文献[21]方法产生的相对均方误差变化范围是 $[0, 815.92\%]$,文献[22]方法产生的相对均方误差变化范围是 $[0.67\%, 626.73\%]$ 。该实验表明当信号频率从50 Hz变化到900 Hz时,本文方法在单个人头区域范围内重建声场的质量比传统方法稳定。

平均相对均方误差(RMSE)是指所有与中心点(也即坐标原点)之间距离相等的非中心区域声场产生的相对均方误差的平均值,不同方法产生的平均相对均方误差的对比图参见图9。其中原始信号频率为900 Hz,非中心区域与中心点之间的距离变化范围是 $[0.085, 0.935]$ m,非中心区域声场的半径为0.085 m。可以看出,随着非中心区域与中心点之间距离的逐渐变化,文献[18]方法产生的平均相对均方误差变化范围是 $[0.45\%, 288.17\%]$,文献[21]方法产生的平均相对均方误差变化范围是 $[2.00\%, 299.14\%]$,文献[22]方法产生的平均相对均方误差变化范围是 $[12.38\%, 220.16\%]$,然而本文方法产生的平均相对均方误差变化范围是 $[0.17\%, 43.36\%]$,低于传统方法产生的平均相对均方误差。实验表明,当非中心区域所在位置发生变化时,本文方法重建声场的平均质量优于传统方法。

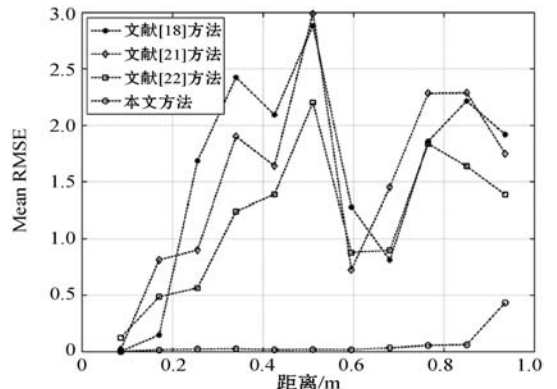


图9 平均相对均方误差与非中心区域和中心点之间距离的关系对比图

4.2 实验分析

上述非中心听音点处实验表明,本文方法优于传统的三种对比方法。其原因是:文献[18]方法只是关注中心听音点处声场得到最优恢复,不关注非中心听音点处声场的恢复情况,因此在非中心点处重建效果不好;文献[21]方法重建目标声场需要扬声器阵列均匀摆放^[25]。然而当进行非中心点声场重建时,文献[21]方法中扬声器阵列相对于非中心点的摆放位置是不均的,因此在非中心点处的重建效果不佳;文献[22]方法虽然克服了扬声器阵列需要均匀摆放的问题,但是它在进行指定区域声场重建时,需要在使用同等数量扬声器的条件下同时恢复多个点处的声音物理性质,导致重建效果不如本文方法。

传统 VBAP 或者文献[18]方法的核心思想是当虚拟声源与扬声器位于同一个球面时,球体中心点处(也即中心听音点)的声场可以得到最佳恢复。本文的方法聚焦于非中心听音点处的声场恢复,借鉴传统方法的思想,以非中心点 O' 作为中心,以虚拟声源和非中心点之间距离作为半径构建虚拟球面。然后将实际扬声器映射到虚拟球面上得到虚拟扬声器的位置,此时虚拟声源和虚拟扬声器位于同一个虚拟球面上,非中心点 O' 变成了虚拟声源和虚拟扬声器的中心点。依据文献[18]方法的原理, O' 处的声场可以得到最佳恢复,并可以由虚拟声源的信号求得虚拟扬声器的信号。再通过保证实际扬声器和虚拟扬声器在 O' 处产生的声压速度相等,由虚拟扬声器的信号求得实际扬声器的信号。通过这种声音信号的两次等价转换可以保证非中心点 O' 处的声场得到较为准确的恢复,所以重建效果优于传统方法。

5 结 语

针对目前已有三维声场重建方法存在非中心点处声场重建误差较大的问题,本文提出了一种非中心点处声场重建方法。借鉴了传统方法中中心点处声场最优恢复的思想,通过构建虚拟扬声器阵列和虚拟扬声器的信号与实际扬声器信号之间的转化,实现非中心点处声场重建,拓宽了已有方法的适用场景和使用范围。仿真实验结果表明:在单个人头区域内,本文方法在非中心点周围的声场重建、相对均方误差、强度流误差、平均相对均方误差这些比较指标上均优于传统方法。本文方法适用于单个听音者在非中心点处进行听音,证实了其有效性。

参 考 文 献

- [1] Gerson M A. Periphony: With-height sound reproduction [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1973, 21(1): 2-10.
- [2] Frank M, Zotter F. Exploring the perceptual sweet area in ambisonics [C]//The 142nd Audio Engineering Society International Convention, 2017: 9727.
- [3] Kaneko S, Okumura H. An immersive 3D audio-visual installation based on sound field rendering and reproduction with higher-order ambisonics [C]//2018 AES International Conference on Spatial Reproduction, 2018.
- [4] Trevino J, Sakamoto S, Suzuki Y. Extending the listening region of high-order ambisonics through series acceleration [C]//2018 AES International Conference on Spatial Reproduction, 2018.
- [5] Gonzalez R, Pearce J, Lokki T. Modular design for spherical microphone arrays [C]//2018 Audio Engineering Society International Convention, 2018.
- [6] Berkhout A J. A Holographic approach to acoustic control [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1988, 36(12): 977-995.
- [7] Bolduc A, Gauthier P A, Berry A. Auralization of vibro-acoustic models in engineering using wave field synthesis: application to plates and transmission loss [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 410: 64-86.
- [8] Firth G, Fiala P, Schultz F, et al. Improved referencing schemes for 2.5d wave field synthesis driving functions [J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, 25(5): 1117-1127.
- [9] 李娟, 李军锋, 颜永红. 波场合成中声像感知距离重建 [J]. 声学学报, 2013, 38(6): 743-748.
- [10] 李娟, 付强, 颜永红. 波场合成与波场分析的有源房间补偿方法 [J]. 声学学报, 2014, 39(9): 137-144.
- [11] Yin F L, Wang L, Chen Z. Review on 3D audio technology [J]. Journal of Communications, 2011, 32(2): 130-138.
- [12] 余光正, 刘昱, 谢波菽. 近场头相关传输函数的多声源快速测量系统设计与验证 [J]. 声学学报, 2017, 42(3): 348-360.
- [13] 钟小丽, 徐秀. 不同测量对头相关传输函数的听觉影响 [J]. 声学学报, 2018, 43(1): 83-90.
- [14] Gupta R, Ranjan R, He J, et al. Investigation of effect of VR/AR headgear on head related transfer functions for natural listening [C]//2018 Audio Engineering Society International Convention, 2018.
- [15] Pulkki V. Virtual Sound source positioning using vector base amplitude panning [J]. Journal of Audio Engineering Society, 1997, 45(6): 456-466.