

基于高阶 Ambisonics 的 2.5 维近场声源合成

周岭松, 鲍长春, 贾懋坤, 步 兵

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124)

摘 要: 针对空间声信号处理中二维声场合成与实际声源维数失配问题及近场声源合成中的近场失真问题, 本文提出了一种 2.5 维声场合成方法和一种改进的维纳滤波的近场补偿方法. 2.5 维声场合成基于高阶 Ambisonics 的球谐函数展开. 改进的维纳滤波方法用于补偿高阶 Ambisonics 合成 2.5 维近场声源时引入的近场失真. 基于连续扬声器阵列假设理论, 推导出了扬声器激励信号的一般表达形式. 声场合成实验结果表明: 与余弦正则化方法产生的相对误差 0.23 相比, 所提方法合成 2.5 维近场声源的相对误差减少到了 0.031; 与高通滤波法相比, 所提方法可以提供更大范围的有效听音区.

关键词: 声信号处理; 声场合成; 扬声器阵列; 球谐函数

中图分类号: TN912.12

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)03-0520-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.03.002

2.5D Near-Field Sound Source Synthesis Using Higher Order Ambisonics

ZHOU Ling-song, BAO Chang-chun, JIA Mao-shen, BU Bing

(School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In the spatial acoustic signal processing, for the issue of dimensionality mismatch between 2-dimensional (2D) sound field synthesis and practical sound source, and the issue of near-field distortion in the near-field sound source synthesis, this paper presents a 2.5-dimensional (2.5D) sound field synthesis method and a modified Wiener filter method for near-field compensation. The 2.5D sound field synthesis is achieved using the spherical harmonics expansion of higher order ambisonics (HOA). The modified Wiener filter is used to compensate the near-field distortion which arises when HOA is utilized to reproduce a 2.5D near-field sound source. Based on the concept of continuous loudspeaker array hypothesis, a general expression of the loudspeaker driving signal is derived. The experiments show that the proposed method reduced the relative error of the synthesized 2.5D near-field from 0.23 to 0.031 in comparison with the cosine regularization method. Meanwhile, the proposed method provides a larger effective listening area compared with the high-pass filter method.

Key words: acoustic signal processing; sound field synthesis; loudspeaker array; spherical harmonics

1 引言

声场合成是声学信号研究领域的一个基本问题, 旨在恢复出与目标声场一致的空间声场, 从而使听音者获得临场感和沉浸感. 声场合成主要以扬声器阵列重放的方式来实现. 现有商用扬声器系统如 Dolby Surround、Dolby Digital 和 Digital Theatre System (DTS) 等, 所有扬声器均是放置在听音者双耳所在平面上. 因而对于平面声场合成的研究更加具有实际意义, 即二维声场合成问题. 在二维声场合成中, 目标声源和扬声器

均假设为线状声源^[1,2], 而实际情况下这些声源应当以三维点声源来建模. 将三维点声源模型应用到二维近场声源合成中, 即是 2.5 维^[3]声源合成研究的问题.

心理声学研究表明^[4], 人耳对距离越近 (约 1m 以内) 的声源感知灵敏度越高. 这类声源称为近场声源. 在声场合成系统中, 近场声源通常位于扬声器阵列的内部, 声场不收敛, 在物理上不可能实现全区域声场的有效合成. 目前的研究主要是通过一定的方法来实现特定听音区域范围内声场的有效合成^[5].

Spors^[6]等人首次提出采用频谱分割法 (Spectral Di-

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2016-03-31; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61231015, No. 61201197); 教育部博士点新教师基金 (No. 20121103120017); 北京市教委科技计划 (No. KM201310005008)

vision Method, SDM) 来实现 2.5 维近场声源合成,但是该方法只适用于直线形分布的扬声器阵列,无法合成全方位角的近场声源. 文献[7]采用基于基尔霍夫-亥姆霍兹方程的波场合成(Wave Field Synthesis, WFS)来合成 2.5 维近场声源. 该方法采用圆形扬声器阵列来合成全方位角的近场声源,然而, WFS 受限于空间采样定理的限制. M. A. Poletti^[8]与 Choi J-W^[9]分别提出了基于多级子扬声器的近场声场合成方法,这类方法能够有效地合成近场声场,但现实实验环境条件下扬声器大都为单极子,此类方法目前只适于仿真研究.

高阶 Ambisonics(Higher Order Ambisonics, HOA)是一种采用柱面谐波/球面谐波来分析和合成空间二维/三维声场的方法,可以应用于任意摆放的扬声器阵列,且不受空间采样定理的限制^[10]. 然而, HOA 采用柱面谐波合成二维声场,存在维度不匹配问题. HOA 可以准确合成远场声源,但对于近场声源,则会导致近场失真. 为了抑制近场失真, Daniel^[11]提出了一种高通滤波的补偿方法,但是近场失真仍较为明显. Ahrens^[12]等人提出了一种余弦正则化的方法,该方法能够有效抑制近场失真,但同时会对合成声场造成影响,整体误差偏大.

基于此,本文将球面谐波分析应用到二维近场声源的合成,即 2.5 维近场声源合成,解决了与实际声源的维度失配问题. 针对 HOA 的近场失真,本文提出了一种改进的维纳滤波的近场补偿方法,实现了 2.5 维近场声源的有效合成. 本文将首先给出 2.5 维声场的球谐函数展开一般表达式;然后在分析近场失真的基础上给出本文提出的改进的维纳滤波补偿方法;基于连续扬声器假设,给出扬声器激励信号的求解方法,实现声场的有效合成;最后通过声场合成实验对本文所提方法进行验证.

2 2.5 维声场的球谐表示

球坐标系下,声波在理想流体介质中传播的波动方程为:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\sin \varphi \frac{\partial P}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + k^2 P = 0 \quad (1)$$

式中 $P(r, \theta, \varphi, k)$ 为声压函数, (r, θ, φ) 为球坐标系, r, θ 和 φ 分别为半径、方位角和仰角, 波数 $k = \omega/c = 2\pi f/c$, f 为频率, c 为波速. 在无源封闭球形区间内,采用分离变量法得到波动方程式(1)的解^[13]:

$$P(\mathbf{X}, k) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m \hat{P}_{mn}(k) j_m(kr) Y_m^n(\theta, \varphi) \quad (2)$$

式(2)中 $\mathbf{X} = (r, \theta, \varphi)$ 为空间内任意观察点, $\hat{P}_{mn}(k)$ 是一个与频率相关的系数, $j_m(kr)$ 为 m 阶球 Bessel 函数, 表示声场中与 r 相关的信息, $Y_m^n(\theta, \varphi)$ 为 m 阶 n 次球谐

函数,代表波动方程解的角度信息.

球谐函数 $Y_m^n(\theta, \varphi)$ 定义为^[13]:

$$Y_m^n(\theta, \varphi) = A_{mn} P_m^{|n|}(\cos \varphi) e^{in\theta} \quad (3)$$

其中

$$A_{mn} = \sqrt{\frac{2m+1}{4\pi} \frac{(m-|n|)!}{(m+|n|)!}} \quad (4)$$

$P_m^{|n|}(\cos \varphi)$ 为 m 阶 n 次缔合勒让德函数. 球谐函数的阶数越高,角度信息越精确. 球谐函数 $Y_m^n(\theta, \varphi)$ 具有正交特性:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} Y_m^n(\theta, \varphi) Y_m^{n*}(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = \delta_{mm} \delta_{nn} \quad (5)$$

式(5)中 $*$ 表示复共轭, δ_{mm}, δ_{nn} 为克罗内克 δ 函数.

观察式(2)可以发现,空间任意声场可以由一系列球谐分量的加权和表示,其基函数为 $j_m(kr) Y_m^n(\theta, \varphi)$. 这即是高阶 Ambisonics 实现声场合成的基本原理.

本文中所有声源以点状源为模型,在自由声场环境下,位于 $\mathbf{X}_s = (r_s, \theta_s, \varphi_s)$ 点的独立点状声源辐射的声场为:

$$P(\mathbf{X}, k) = \frac{e^{ik|\mathbf{X}-\mathbf{X}_s|}}{|\mathbf{X}-\mathbf{X}_s|} \quad (6)$$

其球谐函数展开形式为^[14]:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{X}, k) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m (ik) j_m(kr) h_m^{(1)}(kr_s) Y_m^n(\theta_s, \varphi_s) Y_m^n(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $h_m^{(1)}(\cdot)$ 为 m 阶第一类球 Hankel 函数.

将球谐函数分析应用到二维声场,设定声场合成系统中所有的仰角为 $\pi/2$,则得到 2.5 维声场的球谐函数展开表达式为:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{X}, k) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=|n|}^{\infty} (ik) j_m(kr) h_m^{(1)}(kr_s) Y_m^n(\theta_s, \frac{\pi}{2}) Y_m^n(\theta, \frac{\pi}{2}) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=|n|}^{\infty} (ik) j_m(kr) A_{mn}^2 (P_m^{|n|}(0))^2 h_m^{(1)}(kr_s) e^{-in\theta} e^{in\theta} \end{aligned} \quad (8)$$

3 近场失真及其补偿方法

高阶 Ambisonics 可以准确有效的合成远场声源^[1]. 然而在合成近场声源时高阶 Ambisonics 方法会产生很大失真,即近场失真^[15]. 对于位于 $\mathbf{X}_s = (r_s, \theta_s, \varphi_s)$ 的近场声源,合成声场在半径小于 r_s 的圆形区域内能够与目标声场很好地拟合,然而在该圆面以外的区域内,合成声场与目标声场之间存在很大失真. 当扬声器阵列受到摆放或者其他类型的微小干扰,这些失真将给整个声场造成很大误差,使得听音者无法准确的感知空间声场信息. 因而,有效地抑制或去除这些失真是必

要的。

图 1 所示为 2.5 维声场球谐展开的空间频率特性. 图 1(a) 为远场声源, 图 1(b) 为近场声源. 图中直线为 $n = \lceil kr_s \rceil$ ^[14], $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整. 通过对比可以发现, 近场声源在高阶谐波分量上存在大能量幅值增益, 而远场声源则不存在. 这些高能量增益的高阶谐波分量是造成近场失真的最主要因素.

为了抑制高阶谐波分量引入的近场失真, Daniel^[11] 提出了高通滤波的补偿方法, Ahrens^[12] 等人提出了余弦正则化的方法. 然而这些方法表现都不理想, 因而本文提出了一种改进的维纳滤波的近场补偿方法, 实现近场声源的有效合成.

通过对比远场声源和近场声源的球谐展开表达式, 得到基于扬声器阵列合成近场声源的近场效应表达式为^[15]:

$$H_n^{\text{NFC}(r_s, r_0)} = \frac{F_n(kr_s)}{F_n(kr_0)} \quad (9)$$

式中 r_s 为声源半径, r_0 为扬声器阵列的半径, $F_n(kr_s)$ 为距离传递函数, 其表达式为:

$$F_n(kr_s) = i^n \frac{h_n^{(1)}(kr_s)}{h_0^{(1)}(kr_s)} \quad (10)$$

对于 2.5 维近场声源合成系统, 本文提出的改进的维纳滤波器^[16] 的数学表达式为:

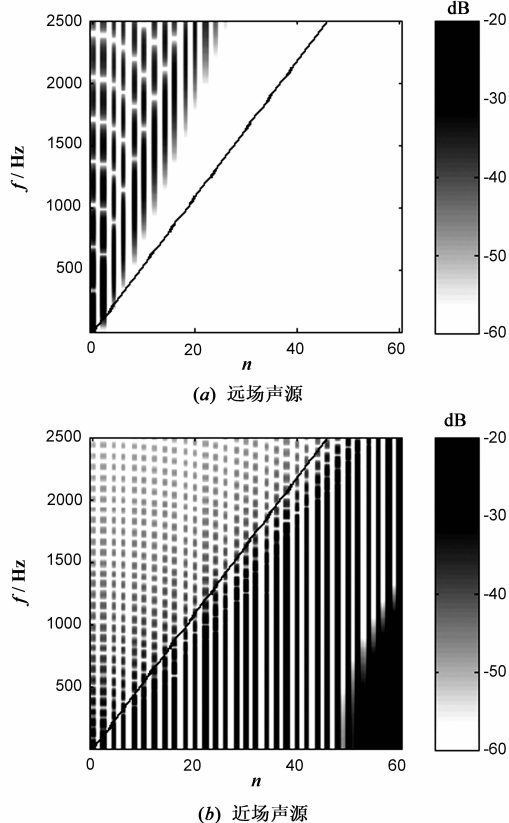


图 1 2.5 维声场球谐展开的空间频率特性

$$w_n(k) = \frac{\lambda_3}{\lambda_1 |H_n^{\text{NFC}(r_s, r_0)}|^2 + \lambda_2} \quad (11)$$

式中 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 为修正系数, 需满足 $\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2$, 从而保证 $|w_n(k)| \leq 1$, 本文中 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的值分别取 1、0.5 和 1.5.

图 2 给出了补偿后的近场声源空间频率特性. 图 2 (a)、(b) 和 (c) 分别对应高通滤波法、余弦正则化法和本文所提改进的维纳滤波方法. 通过对比图 2 和图 1 (b) 可以发现, 三种方法均能够抑制高阶谐波分量的作用. 然而, 高通滤波方法补偿后近场声源的空间频谱在 $n = \lceil kr_s \rceil$ 突变, 并且高能量的高阶谐波分量仍会造成失真. 余弦正则化方法能够有效去除高阶谐波分量, 并且能量主要集中在低阶谐波成分上, 但是却过多的去除了声场的信息. 本文所提的改进的维纳滤波方法, 能够在有效去除高阶谐波分量的基础上, 很好的保存声场信息.

将改进的维纳滤波器 (11) 代入到 2.5 维近场声源球谐函数展开表达式 (8) 中, 则可以得到补偿后的近场

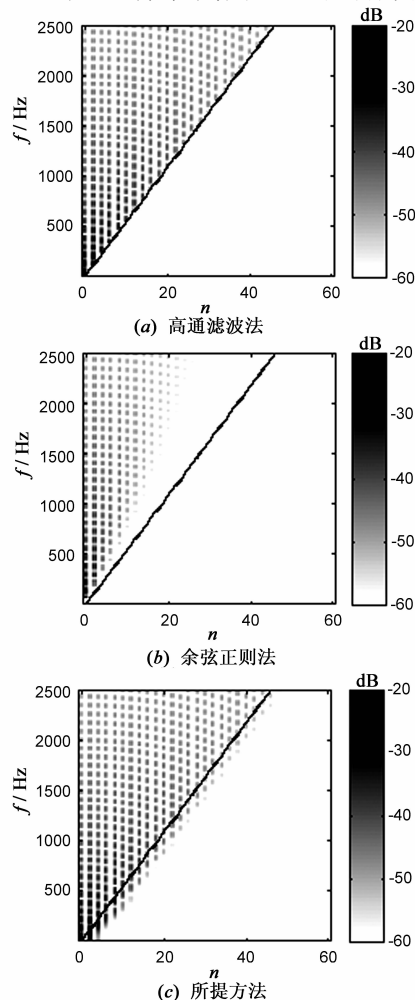


图 2 补偿后 2.5 维声场的空间频率特性

声源一般表达式为:

$$P(\mathbf{X}, k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=|n|}^{\infty} w_n(k) (ik) j_m(kr) A_{mn}^2 (P_m^{lnl}(0))^2 \cdot h_m^{(1)}(kr_s) e^{-in\theta} e^{in\theta} \quad (12)$$

式中 $w_n(k)$ 为改进的维纳滤波器, $\mathbf{X}_s = (r_s, \theta_s)$ 为近场声源, $\mathbf{X} = (r, \theta)$ 为任意观察点坐标矢量.

4 扬声器激励信号求解

采用扬声器阵列合成 2.5 维近场声源的核心问题在于扬声器激励信号的求解. 只要给予适当的激励信号, 则扬声器阵列能够有效的恢复出目标声场. 基于连续扬声器理论, 接下来将推导出合成 2.5 维近场声源的扬声器激励信号一般表达形式.

连续扬声器理论^[14]表明, 在封闭圆形区间内, 任意点 $\mathbf{X} = (r, \theta, \pi/2)$ 处的声压可以由边界上各个扬声器激励信号 $E(\mathbf{X}', k)$ 与其对应的空间传递函数 $H(\mathbf{X} - \mathbf{X}', k)$ 共同作用得到:

$$P(\mathbf{X}, k) = \int_0^{2\pi} E(\mathbf{X}', k) \cdot H(\mathbf{X} - \mathbf{X}', k) d\theta' \quad (13)$$

式中 $\mathbf{X}' = (r_0, \theta', \pi/2)$ 为扬声器的坐标矢量.

在自由声场环境下, 位于 $\mathbf{X}' = (r_0, \theta', \pi/2)$ 处扬声器的空间传递函数可以等价为格林函数. 自由声场的格林函数为^[13]:

$$\begin{aligned} H(\mathbf{X} - \mathbf{X}', k) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=-m}^m (ik) j_m(kr) h_m^{(1)}(kr_0) Y_m^n(\theta', \frac{\pi}{2})^* Y_m^n(\theta, \frac{\pi}{2}) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=|n|}^{\infty} (ik) j_m(kr) h_m^{(1)}(kr_0) A_{mn}^2 (P_m^{lnl}(0))^2 e^{-in\theta} e^{in\theta} \end{aligned} \quad (14)$$

以傅里叶级数的形式来表示扬声器激励信号, 扬声器激励信号的傅里叶级数展开表达式为^[1]:

$$E(\mathbf{X}', k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n(k) e^{in\theta'} \quad (15)$$

其中 $E_n(k)$ 为激励信号 $E(\mathbf{X}', k)$ 的傅里叶展开系数.

将式(14)和式(15)代入式(13)中, 得到扬声器阵列所包围区域内合成的空间声场为:

$$P_{\text{rep}}(\mathbf{X}, k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=|n|}^{\infty} E_n(k) (ik) j_m(kr) h_m^{(1)}(kr_0) \cdot A_{mn}^2 (P_m^{lnl}(0))^2 e^{in\theta} \quad (16)$$

为了求解连续扬声器阵列的激励信号, 建立合成声场式(16)与目标声场式(12)之间的等式, 即:

$$P_{\text{rep}}(\mathbf{X}, k) = P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k) \quad (17)$$

对于前 N 阶, 得到激励信号的傅里叶展开系数为:

$$E_n(k) = \frac{2\pi w_n(k) A_n(kr_s)}{B_n(kr_0)} e^{-in\theta}. \quad (18)$$

式中

$$A_n(kr_s) = \sum_{m=|n|}^N h_m^{(1)}(kr_s) \quad (19)$$

$$B_n(kr_0) = \sum_{m=|n|}^N h_m^{(1)}(kr_0) \quad (20)$$

将式(18)代入式(15), 则可以得到基于连续扬声器阵列合成近场声源的激励信号解析表达式为:

$$E(\mathbf{X}', k) = \sum_{n=-N}^N \frac{2\pi w_n(k) A_n(kr_s)}{B_n(kr_0)} e^{in(\theta' - \theta_s)} \quad (21)$$

在实际采用扬声器阵列实现 2.5 维近场声源合成的系统中, 通常采用有限个扬声器来实现目标声场的重建. 为了采用有限个扬声器来逼近连续扬声器阵列的效果, 通过分析空间频率特性^[17] 得出扬声器个数与最高非零阶数之间应当满足约束条件:

$$L \geq 2N + 1 \quad (22)$$

扬声器离散化问题的具体分析不在本文的讨论范畴, 有兴趣的读者可以参考文献[17].

5 2.5 维近场声源合成

在采用离散扬声器阵列合成近场声源的系统中, 如果扬声器个数 L 与谐波最高阶数 N 满足 $L \geq 2N + 1$, 则可用离散扬声器阵列去逼近连续扬声器系统合成多源声场的效果. 通过式(21)求解出各个位置的激励信号并给予相应的扬声器以激励, 实现目标 2.5 维近场声源的有效重建. 则有基于扬声器阵列合成的 2.5 维近场声源:

$$P(\mathbf{X}, k) = ik \sum_{n=-N}^N \sum_{m=|n|}^{\infty} w_n(k) j_m(kr) A_{mn}^2 (P_m^{lnl}(0))^2 \cdot h_m^{(1)}(kr_s) e^{in(\theta - \theta_s)} \quad (23)$$

式中 $w_n(k)$ 为改进的维纳滤波的补偿函数, r_0 为扬声器阵列半径.

6 仿真结果分析

在本实验中, 2.5 维近场声源的位置为 $(0, -1, 0)$. 有效听音区域的半径设为 1m. 扬声器阵列的数量及摆放与文献[14]一致, 即等间隔的放置于半径为 1.5m 的圆上, 扬声器个数 $L = 56$. 该扬声器阵列的空间奈奎斯特频率^[5] 为 1kHz, 为了防止空间混叠造成的失真, 取声波的频率 $f = 800\text{Hz}$. 依据约束条件 $L \geq 2N + 1$, 本实验中设定最高阶数 $N = 27$.

扬声器激励信号由式(21)计算得出并分配给阵列中各个相应的扬声器, 合成的 2.5 维近场声源如图 3(b)所示. 声场图为 $300 * 300$ 逐点计算并以密度图的形式表现的. 声压大小是由不同的灰色阴影程度表示, 小于 -1 的声压为黑色的, 声压大于 1 是白色, 两者之间的声压为适当的灰色. 图 3(a) 为自由空间内 2.5 维近场声源的辐射声场(实部), 即目标声场. 圆形虚线所包围区域为有效听音区域. 观察图 3 可以发现, 在有效听

音区域内,除了声源点附近存在一定的误差,其余绝大部分区域的合成声场与目标声场基本一致。

基于高通滤波^[11]和余弦正则化方法^[12]的近场声源合成结果如图4和图5。图4(a)和图5(a)为2.5维近场声源辐射的目标声场(实部),图4(b)和图5(b)为合成近场声源的声场图。通过与图3对比可以发现,采用本文所提方法合成的声场准确性较参考方法具有一定提升。

图3~5的子图(c)为各个方法的合成声场与目标声场的绝对误差 $20 * \log_{10} | \text{real}(P_{\text{syn}}(\mathbf{X}, k) - P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k)) |$, $P_{\text{syn}}(\mathbf{X}, k)$ 和 $P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k)$ 分别表示合成声

场和目标声场,real表示取复数的实部。图3(c)为所提方法,图4(c)为高通滤波法,图5(c)为余弦正则化方法。通过观察可以发现,本文所提方法能够有效合成更大区域的声场。

本文以声场重建的相对误差来进行评测,相对误差定义为:

$$\varepsilon(k) = \frac{\int_S |P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k) - P_{\text{syn}}(\mathbf{X}, k)|^2 dS}{\int_S |P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k)|^2 dS} \quad (24)$$

其中 S 是半径为 R 的合成声场面积, $P_{\text{syn}}(\mathbf{X}, k)$ 和 $P_{\text{tar}}(\mathbf{X}, k)$ 分别表示合成声场和目标声场。

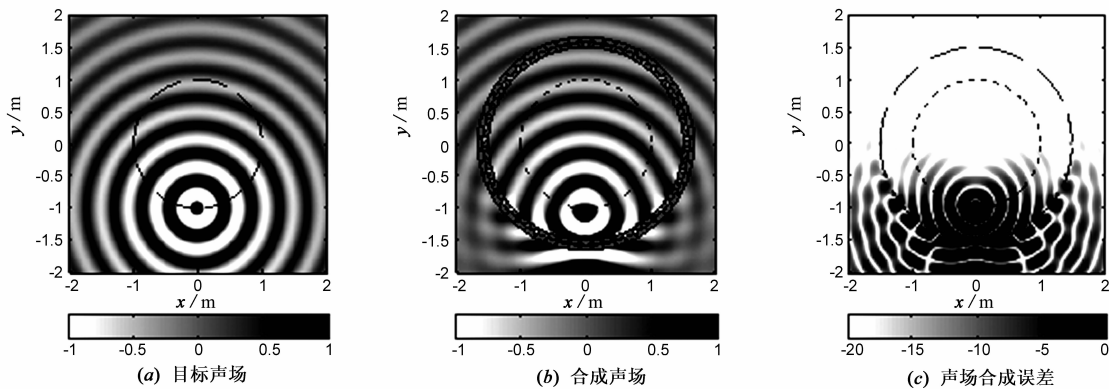


图3 基于所提方法的2.5维近场声源合成

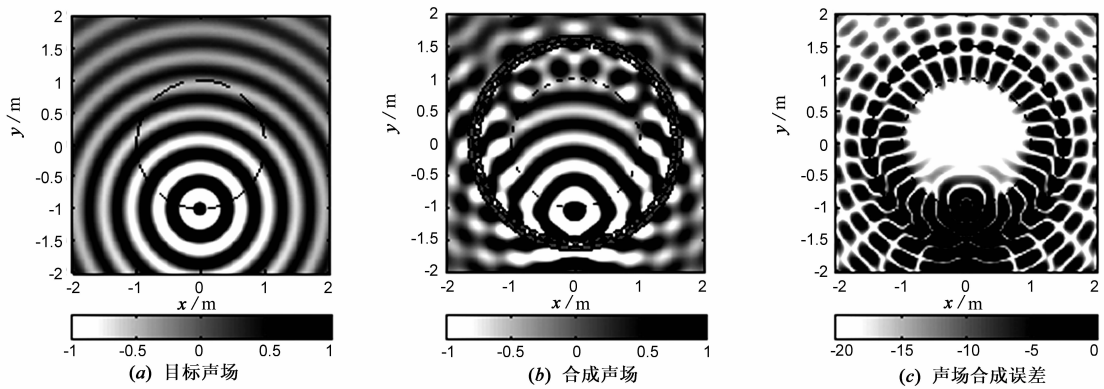


图4 基于高通滤波的2.5维近场声源合成

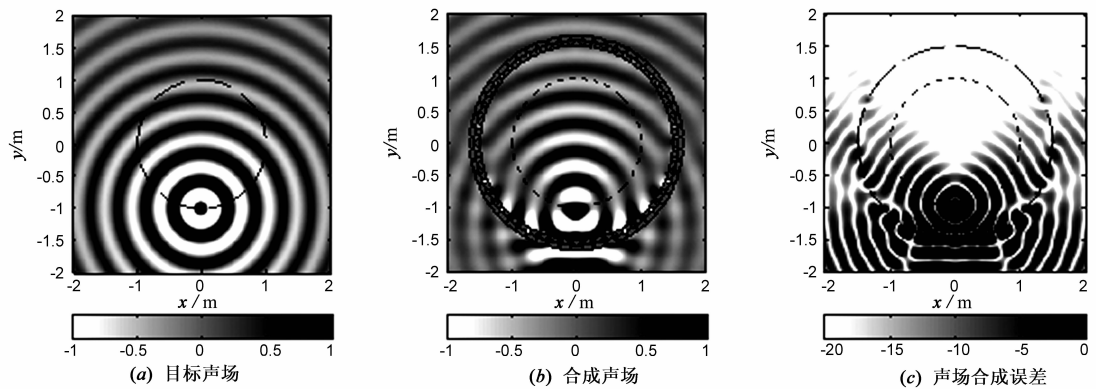


图5 基于余弦正则化的2.5维近场声源合成

由文献[18]可知,当声场重建相对误差小于 0.04 时则可认为目标声场被有效重建.在有效听音区域内,采用本文所提方法、高通滤波和余弦正则化方法合成近场声源的相对误差分别为 0.031、0.020 和 0.23.虽然高通滤波法的相对误差小于本文所提方法,然而从图 3~图 5 的子图(c)对比可以发现,高通滤波只在有效听音区域内表现较好,而在听音区域外存在较大失真,这些失真在受到其他扰动时则会影响听音者对声场信息的感知.余弦正则化方法虽然很好的去除了听音区域外的失真,然而却造成了听音区域内的声场损失,且失真超过了期望值 0.04.因此可以得出结论,相对于参考方法,本文所提方法可以更为有效的合成 2.5 维近场声源.

近场声源合成的相对误差随着 kr 的变化规律如图 6 所示,其中 N 分别取 7、11、15、19、23 和 27.由图中可以看出,对于特定的 N ,当 $kr > N$ 时开始出现失真,图中表现为失真曲线开始上扬,并且随着 kr 值的增大,失真单调递增.同时我们可以发现,对于给定的 kr , N 越大,则声场合成的相对误差越小.该实验结果可以有效的验证谐波展开谐波阶数 N 的选取需依据经验法则 $N = \lceil kr \rceil$ ^[18],只有满足该条件,2.5 维近场声源才能够被有效合成.

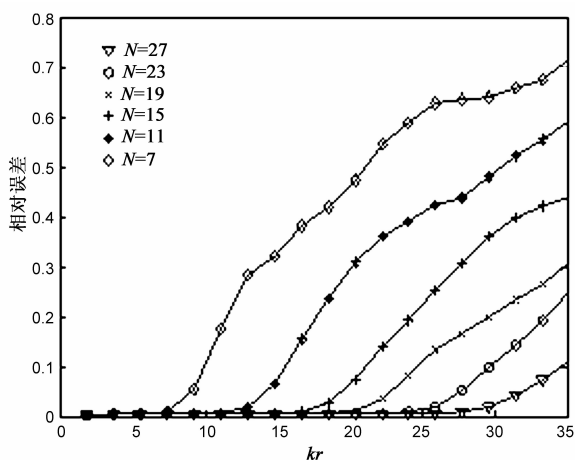


图6 相对误差示意图

7 总结

本文将高阶 Ambisonics 的球谐函数展开应用于二维声场合成,提出了一种 2.5 维近场声源合成方法.相对于现有方法,本文提出的改进的维纳滤波近场补偿方法能够更为有效的抑制 HOA 的近场失真.本文给出了合成 2.5 维近场声源所需扬声器激励信号的求解方法,并进行了声场合成实验仿真.仿真结果表明,采用本文所提方法 2.5 维近场声源能够被有效合成,且性能优于参考方法.此外,通过声场合成实验分析了谐波展

开阶数 N 对声场合成误差的影响.扬声器精简和主观测听实验将在下一步工作进行研究.

参考文献

- [1] Wu Y J, Abhayapala T D. Theory and design of soundfield reproduction using continuous loudspeaker concept [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2009, 17(1): 107-116.
- [2] Zhou L S, Jia M S, Bao C C, Bu B. Multi-source sound field reproduction using cylindrical harmonic analysis [A]. Proceedings of IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing (China-SIP) [C]. Xi'an: IEEE, 2014. 129-132
- [3] Zhang W, Abhayapala T D. 2.5D sound field reproduction in higher order ambisonics [A]. Proceedings of the 14th International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC) [C]. Juan-les-Pins: IEEE, 2014. 342-346.
- [4] Brungart D, Rabinowitz W. Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 106(3): 1465-1479.
- [5] Poletti M A. Improved methods for generating focused sources using circular arrays [A]. Proceedings of the 133rd Audio Engineering Society Convention [C]. San Francisco, CA, USA: AES, 2012. Paper No. 8719.
- [6] Spors S, Ahrens J. Reproduction of focused sources by the spectral division method [A]. Proceedings of the 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing [C]. Limassol: IEEE, 2010. 1486-1491.
- [7] Wierstorf H, Raake A, Geier M, Spors S. Perception of focused sources in wave field synthesis [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2013, 61(1/2): 5-16.
- [8] Poletti M A, Abhayapala T D. Interior and exterior sound field control using general two dimensional first-order sources [J]. Journal of the Acoustic Society of America, 2011, 129(1): 234-244.
- [9] Choi J-W, Kim Y-H. Sound field reproduction of a virtual source inside a loudspeaker array with minimal external radiation [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing, 2013, 21(2): 247-259.
- [10] Gerzon M A. Periphony: With-height sound reproduction [J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1973, 21(1): 2-10.
- [11] Daniel J, Moreau S. Further study of sound field coding with higher order ambisonics [A]. Proceedings of the 116th Audio Engineering Society Convention [C]. Berlin, Germany: AES, 2004. Paper No. 6017.
- [12] Ahrens J, Spors S. Spatial encoding and decoding of focused virtual sound sources [A]. Proceedings of the First Interna-

- tional Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics [C]. Graz, Austria; Ambisonics Symposium, 2009.
- [13] Williams E G. Fourier Acoustic; Sound Radiation and Near-field Acoustical Holography [M]. London, England; Academic Press, 1999.
- [14] Ahrens J. Analytic Methods of Sound Field Synthesis [M]. Berlin, Germany; Springer Press, 2012.
- [15] Favrot S, Buchholz J M. Reproduction of nearby sound sources using higher-order ambisonics with practical loudspeaker arrays [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2012, 98(1): 48 – 60.
- [16] Laokulrat N, Maeda Y, Sugimoto M, Hashizume H. Wiener-filter-based compensation of a transmitter's radiation pattern using synthetic transmit aperture acoustic imaging [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(11); Paper No. 114011.
- [17] Spors S, Rabenstein R. Spatial aliasing artifacts produced by linear and circular loudspeaker arrays used for wave field synthesis [A]. Proceedings of the 120th Audio Engineering Society Convention [C] France; AES, 2006. Paper No. 6711.
- [18] Ward D B, Abhayapala T D. Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2001, 9(7): 697 – 707.

作者简介



周岭松 男, 1990 年生于江西九江. 现为北京工业大学硕士研究生. 主要研究方向为空间音频信号处理.

E-mail: zhoulingsong2008@126.com



鲍长春 男, 1965 年生于内蒙古赤峰. 现为北京工业大学教授、博士生导师. 主要研究方向为语音与音频信号处理.

E-mail: chchbao@bjut.edu.cn



贾懋坤 男, 1982 年生于河北张家口. 现为北京工业大学讲师. 主要研究方向为空间音频信号处理.

E-mail: jiamaoshen@bjut.edu.cn



步兵 男, 1989 年生于河北衡水. 现为北京工业大学博士研究生. 主要研究方向为空间音频信号处理.

E-mail: bubing@emails.bjut.edu.cn