

◇ 研究报告 ◇

一种数字有源降噪耳机控制器设计方法*

张振超^{1,2} 安峰岩¹ 吴鸣¹ 杨军^{1,2†}

(1 中国科学院噪声与振动重点实验室(声学研究所) 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 为了得到一种作用于低频宽带噪声的有源降噪耳机,采用固定系数的数字控制器实施降噪,并提出了一种前反馈混合的控制器设计方法。比较了前馈及混合两种控制模式下对低频宽带噪声的控制效果;进一步提出了一种综合优化方法,改善噪声不同角度入射下的降噪性能。仿真和基于 DSP 平台的实验表明,提出的方法对多方向入射的 20~1500 Hz 低频宽带噪声均具有较好控制效果。

关键词 有源降噪耳机,混合控制

中图分类号: TB535.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)04-0317-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.04.006

A method for controller design of digital active noise control headsets

ZHANG Zhenchao^{1,2} AN Fengyan¹ WU Ming¹ YANG Jun^{1,2}

(1 Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to control low frequency broadband noise, fixed digital controller is used to control the noise in the active noise control headsets, and a method for the controller design is proposed. With the feedforward/feedback hybrid control, the control performances to low frequency broadband noise under feedforward and hybrid control are compared. Furthermore, an optimization method to improve the performance of the headsets under the noise from different angles is proposed. Simulations and DSP experiments show that the proposed method brings good control performance under 20~1500 Hz low frequency broadband noise from different angles.

Key words Active noise control headsets, Hybrid control

2016-10-18 收稿; 2017-02-05 定稿

*国家自然科学基金资助项目 (11404367, 11474306, 11404368)

作者简介: 张振超 (1991-), 男, 云南红河州人, 硕士研究生, 研究方向: 信号与信息处理。

† 通讯作者 E-mail: jyang@mail.ioa.ac.cn

1 引言

有源噪声控制 (Active noise control, ANC)^[1-2] 通过产生与噪声信号幅度相同、相位相反的声波, 和噪声声波产生干涉性叠加从而达到噪声控制的目的。模拟电路结构的 ANC 耳机技术已经比较成熟, 前馈、反馈、混合式的模拟 ANC 耳机均已在市场上得到了广泛应用。然而其电路结构复杂, 滤波器实现方法有限, 固化的内部电路无法适应次级通道和外界噪声的变化, 而且一旦设计成形, 修改和升级难度较大。相比之下, 数字 ANC 耳机可以实现自适应的噪声控制与次级通道辨识; 采用模块化设计, 方便调试与后续功能升级; 可以自适应地调整耳机频响曲线, 提升声重放品质, 增强音频现实^[3-4]等, 因此, 数字化是 ANC 耳机的发展趋势。

前人对数字 ANC 耳机做了大量研究。Song 等为了减小次级通道的改变对耳机性能的影响, 在数字前馈系统中加入了模拟反馈电路, 然而只给出了对窄带噪声控制效果^[5]。之后, Kuo 等又基于 DSP 实现了一种自适应反馈耳机, 不过依然只给出了对线谱噪声的控制效果^[6]。Foo 等提出了一种变步长的归一化 LMS 算法, 极大地提高了自适应反馈耳机的降噪效果, 实验结果表明对飞机、地铁、汽车等实际噪声可以达到 37 dB 的控制效果, 然而优异的降噪性能带来了更大的系统复杂度和计算量^[7]。Schumacher 等使用一种混合模型对 700 Hz 以下的低频噪声实现了 20 dB 的控制效果, 其中非自适应的反馈通道用来控制环境宽带噪声, 自适应反馈通道用来控制线谱噪声, 实验中使用了高性能的 AD/DA 器件来保证低延迟^[8]。之后的一些研究更倾向于降低复杂度, 提高商用可能性。Chang 等基于单片机, 使用改进的反馈自适应结构, 对 250~300 Hz 的窄带噪声达到 20 dB 控制的同时大大降低了硬件成本^[9]。Wu 等指出由于噪声不可能得到完全控制, 误差信号中还含有参考信号, 因此直接把残留的误差信号作为反馈系统的参考输入信号。这种结构简单, 避免了次级通道的辨识, 然而实验中对 250~350 Hz 带宽的噪声仅能达到 5 dB 的降噪量^[10]。在影响降噪效果的因素研究中, Rafaely 等研究了噪声的特性和耳机所处的声学环境对耳机降噪性能的影响, 指出了在低反射环境中, 入射噪声主要为直达声, 噪声的入射角为 0° 时可以获得最佳控制效果, 当处于其它角度时则降噪效果会急剧

下降, 并且这种影响随着噪声带宽的增加而更加明显^[11]。张丽敏等提出了不同角度的入射噪声会导致非因果延迟, 提出了一种该条件下预测耳机降噪性能的方法^[12]。在研究次级通道不确定性的问题时, 赵剑发现了混合控制中固定系数的控制器可以有效降低次级通道差异对降噪性能的影响^[13]。

前人的研究表明, 受复杂度和成本的制约, 现有的自适应数字 ANC 耳机难以成熟应用。为了兼顾复杂度和降噪性能, 得到一种成本较低的数字 ANC 耳机, 采用了固定系数的前反馈混合控制器。基于内模型法 (IMC) 和双通道有源噪声控制模型^[14], 得到了混合控制器的设计方法。对文献 [11-12] 提到的降噪性能随噪声入射角度变化而急剧下降的问题, 提出了一种综合优化方法。通过仿真和实验, 对比了前馈和混合控制模式的噪声控制效果, 验证了噪声入射角度变化时, 综合优化方法对降噪效果的改善。

2 控制原理及优化方法

固定系数控制器的有源噪声控制通过离线辨识的方式得到次级通道模型, 结合初级噪声的先验信息计算控制器的维纳解, 利用该维纳解得到相应的次级输出信号。对应非时变的次级通道和初级噪声, 这种控制是最优解。

2.1 控制原理

常见的有源噪声控制模式有前馈控制和反馈控制。前馈控制模式对噪声的控制稳定性好, 控制效果更佳, 但有可能存在次级声反馈问题; 反馈控制模式结构简单, 只需要一个传感器, 但稳定性差, 存在水床效应。结合前、反馈控制模式, 可以得到效果更优的混合控制模式。基于内模型法的混合结构的原理框图如图 1, 其本质是两通道的有源噪声控制

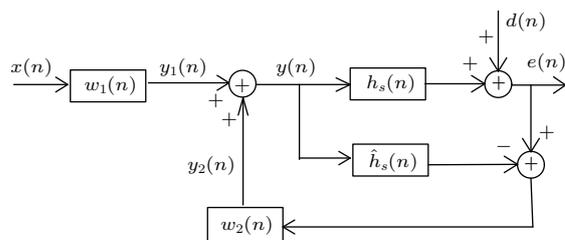


图 1 有源混合控制系统简化框图

Fig. 1 Block diagram of feedforward/feedback hybrid active control system

系统,两个通道分别实现前馈控制和反馈控制。图1中 $x(n)$ 为参考信号, $h_s(n)$ 为次级通道, $\hat{h}_s(n)$ 为次级通道模型。

以误差信号的均方误差 $J(n) = E[e^2(n)]$ 为目标函数,定义控制器系数由 I 阶的前馈控制器 w_1 和反馈控制器 w_2 组合而成,即

$$w = [w_{1,1} \ w_{2,1} \ w_{1,2} \ w_{2,2} \ \cdots \ w_{1,I} \ w_{2,I}]^T \quad (1)$$

对于平稳初级噪声, $J(n)$ 是滤波器权矢量

$$R = \begin{bmatrix} R_{r_1 r_1}(0) & R_{r_1 r_2}(0) & \cdots & R_{r_1 r_1}(I-1) & R_{r_1 r_2}(I-1) \\ R_{r_2 r_1}(0) & R_{r_2 r_2}(0) & \cdots & R_{r_2 r_1}(I-1) & R_{r_2 r_2}(I-1) \\ R_{r_1 r_1}(-1) & R_{r_1 r_2}(-1) & \cdots & R_{r_1 r_1}(I-2) & R_{r_1 r_2}(I-2) \\ R_{r_2 r_1}(-1) & R_{r_2 r_2}(-1) & \cdots & R_{r_2 r_1}(I-2) & R_{r_2 r_2}(I-2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}_{2I \times 2I}, \quad (4)$$

$$p = E [r_1(n)d(n) \ r_2(n)d(n) \ \cdots \ r_1(n-I+1)d(n) \ r_2(n-I+1)d(n)]^T, \quad (5)$$

式(4)中自相关矩阵 R 由四个 toepnitz 矩阵组成,分别为滤波 $-x$ 信号 $r_1(n)$ 、 $r_2(n)$ 的自相关矩阵 $R_{r_1 r_1}$ 、 $R_{r_2 r_2}$ 和互相关矩阵 $R_{r_1 r_2}$ 、 $R_{r_2 r_1}$ 。奇行奇列由 $R_{r_1 r_1}$ 的元素组成,偶行偶列由 $R_{r_2 r_2}$ 的元素组成,奇行偶列由 $R_{r_1 r_2}$ 的元素组成,偶行奇列由 $R_{r_2 r_1}$ 的元素组成,这样的排列方便对四个矩阵分别进行计算并填入自相关矩阵 R 。式(5)中奇数行为 $r_1(n)$ 和 $d(n)$ 的互相关向量,偶数行为 $r_2(n)$ 和 $d(n)$ 的互相关向量。

2.2 一种综合优化方法

采用固定系数控制器的 ANC 耳机对非时变噪声可以实现最优控制。但耳机在使用过程中,噪声入射角度不是固定的,入射角度的改变,使参考和期望信号的特征也发生变化,控制器系数不再是最优解,噪声控制性能下降。下文提出一种综合最优控制器的设计方法,设计中结合多角度入射噪声的信息,使该控制器对多角度的噪声控制效果总体最优。

初级噪声源位于耳机的6个不同方位,用角度1~6表示,如图2所示。当噪声源方位发生变化时,要求固定控制器 $w_o(n)$ 对各个角度噪声的控制效果不会急剧下降,定义控制器对各个角度的控制目标函数为均方误差,即 $J_i = E[e_i^2(n)]$,控制器设计的目标函数为多组均方误差之和:

$w(n)$ 的二次型函数,当自相关矩阵 R 正定对称时, $J(n)$ 存在唯一最小值:

$$J_{\min} = E[d^2(n)] - w_0^T p. \quad (2)$$

对应混合控制模式的维纳解为

$$w_0 = -R^{-1} p. \quad (3)$$

基于双通道有源噪声控制的原理^[1],式(3)中自相关矩阵 R 和互相关向量 p 分别为

$$J = \sum_{i=1}^n E[e_i^2(n)]. \quad (6)$$

根据 $e(n)$ 的定义,可得 J 的展开表达式:

$$J(n) = \sum_{i=1}^n \{E[d_i^2(n)] + 2p_i^T w + w^T R_i w\}. \quad (7)$$

为使目标函数最小化,令 $\frac{\partial J}{\partial w} = 0$,可得综合控制器系数为

$$w_o = -\left(\sum_{i=1}^n R_i\right)^{-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n p_i\right), \quad (8)$$

其中, R_i 和 p_i 分别是第 i 个角度噪声的自相关矩阵和互相关向量。

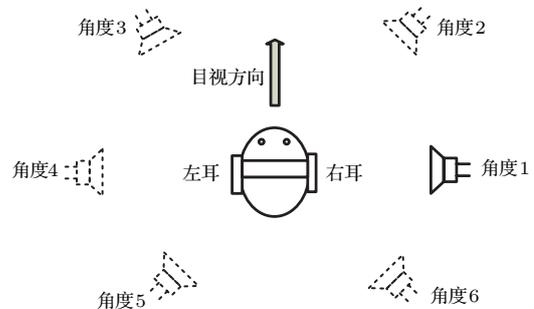


图2 初级噪声源与人工头方位示意图

Fig. 2 Position of dummy head and primary noise source

式(3)的控制器对单一入射角度噪声有最大控制增益,但噪声入射角度变化时,控制器系数将不再是最优解,噪声控制效果会急剧下降。而采用式(8)方法设计的控制器在噪声入射角度变化的情况下,对各角度噪声的控制增益之和最大,总体控制效果最优;但分别对于每个角度的噪声,控制增益无法达到式(3)方法的效果,第4节通过仿真和实验对此进行了验证。

3 控制系统性能

通过仿真和实验进一步说明前馈和混合控制模式的性能差异。实验在普通房间进行,如图3。耳机采用市场上的降噪耳机,去除自带的降噪模块后,连接到基于TMS320DSP芯片的开发板构成有源降噪系统,控制器 $w(n)$ 为1000阶FIR滤波器,阶数的选择兼顾了逼近最优滤波器的程度和计算时延。CODEC模块采用ADI公司的产品,采样率16 kHz,功放采用TI集成功放芯片,输出最大功率为20 W。测试时耳机戴在G.R.A.S人工头上以获得较真实的次级通道,音箱作为初级噪声源,距离人工头100 cm。参考和误差传声器均使用耳机中自带的传声器,误差传声器位于耳机内靠近人耳一侧,参考传声器位于耳机外壳内壁。



图3 基于DSP的ANC耳机测试实物图

Fig. 3 Active noise control headset based on DSP

控制器系数的设计,首先利用次级声源产生白噪声对次级通道和次级声反馈通道进行离线辨识;之后,音箱产生初级噪声,参考和误差传声器分别采集参考信号 $x(n)$ 和期望信号 $d(n)$,结合次级通道信息得到滤波 $-x$ 信号 $r(n)$;控制器系数的设计离线完成,根据式(4)、式(5)计算自相关矩阵 \mathbf{R} 和互相关向量 \mathbf{p} ,再根据式(3)设计得到最优控制器系数,对初级噪声进行实时控制。

3.1 低频宽带噪声控制效果

初级噪声源置于被测耳机的零度方位,分别仿真和实验了低频宽带噪声下前馈模式和混合模式的最优降噪效果。白噪声经过20~1500 Hz低通滤波后作为初级噪声。定义噪声控制增益为

$$Re = 10 \lg \left[\frac{\sum_n d^2(n)}{\sum_n e^2(n)} \right]. \quad (9)$$

图4给出了前馈模式的噪声控制波形,仿真噪声控制增益为14.1 dB,实验增益为13.3 dB。

图5为混合模式的噪声控制波形,仿真噪声控制增益为15.1 dB,实验增益为14.5 dB。

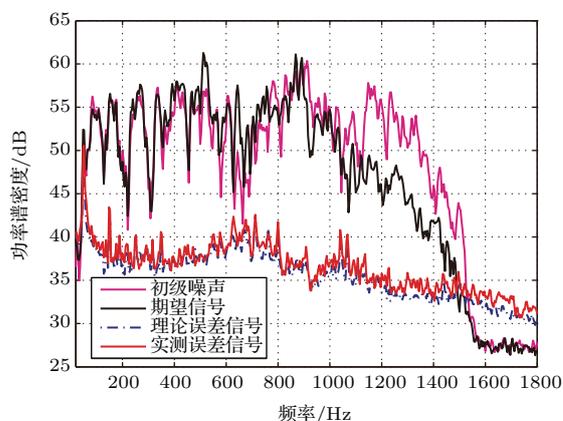


图4 前馈模式宽带噪声控制效果

Fig. 4 Feedforward control performance under broadband noise

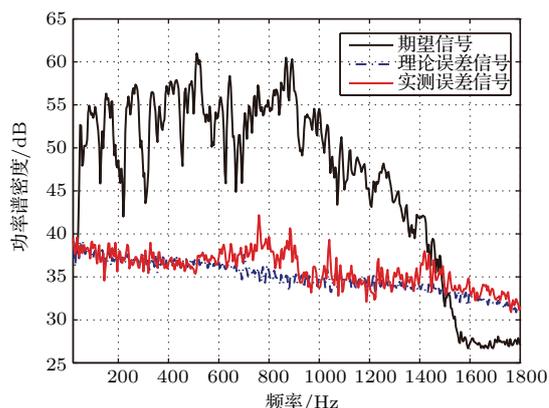


图5 混合模式宽带噪声控制效果

Fig. 5 Hybrid control performance under broadband noise

3.2 复合噪声控制效果

白噪声经过20~1500 Hz低通滤波后混入150 Hz的单频信号作为初级噪声,以测试两种控制模式对宽带线谱复合噪声的控制效果。

图6给出了前馈控制噪声波形,仿真噪声控制增益12.9 dB,实验增益为11.8 dB。

图7给出了混合控制噪声波形,仿真噪声控制增益为13.8 dB,实验增益为13.4 dB。

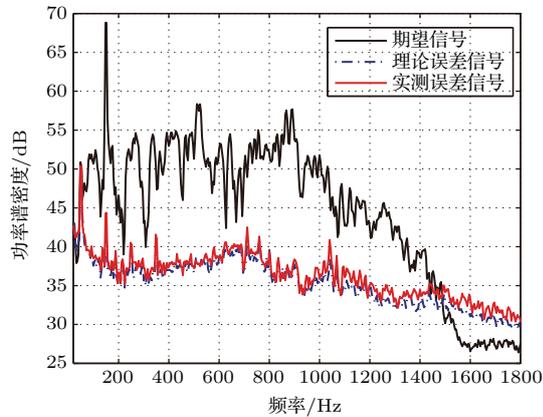


图6 前馈模式复合噪声控制效果

Fig. 6 Feedforward control performance under mixed noise

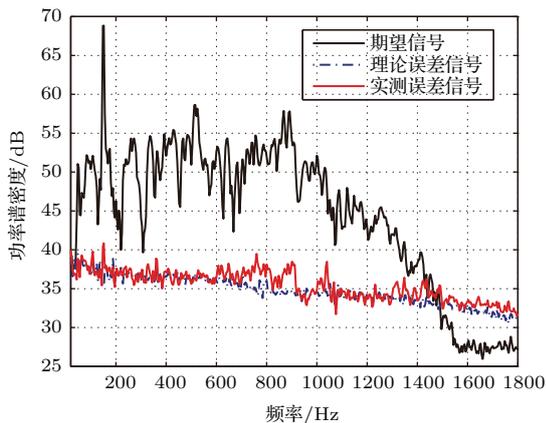


图7 混合模式复合噪声控制效果

Fig. 7 Hybrid control performance under mixed noise

本实验中噪声频率分布在20~1500 Hz,图4-图7中的期望信号为误差传声器处的原始噪声信号,误差信号为打开ANC功能后误差传声器处的残留噪声信号。图4加入了初级噪声信号,由附加传声器在耳罩外测得,通过比较初级噪声和期望信号,实验耳机外壳对1100 Hz以上的噪声有5~10 dB不等的被动降噪效果。仿真结果表明,在理想情况下,前馈模式对低频宽带噪声可以达到14.1 dB的噪声控制增益,混合模式则可以达到15.1 dB。

实验使用800阶FIR滤波器逼近次级通道模型,次级通道模型的误差导致两种模式下实测噪声控制量有所下降,前馈模式对低频宽带噪声的控制

增益为13.3 dB,混合模式为14.5 dB;从降噪曲线来看,前馈模式在大部分频率上可以达到10~20 dB不等的降噪量,但对某些频率点没有控制效果,而混合模式则对整个频带上的噪声可达15~20 dB的控制。

仿真和实验表明,2.1节得出的这种混合控制模式在控制增益和降噪曲线上都明显优于前馈控制。前馈控制的降噪曲线中仍存在一些降噪量不足的频率点,这主要是由两方面的原因造成的。首先,在宽带噪声的前馈控制中,受有限滤波器长度的约束,实际控制器无法达到理想频率响应,造成噪声频段中各个频率的降噪效果不一。其次,前馈控制中各频率点的最大降噪量由参考、期望信号在该频率的相关程度决定^[14],如式(10):

$$\begin{aligned} \frac{S_{ee,\min}(e^{j\omega T})}{S_{dd}(e^{j\omega T})} &= 1 - \frac{|S_{xd}(e^{j\omega T})|^2}{S_{xx}(e^{j\omega T})S_{dd}(e^{j\omega T})} \\ &= 1 - \gamma_{xd}^2(e^{j\omega T}), \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)表明参考信号一定的情况下,误差信号功率谱密度的最小值 $S_{ee,\min}(e^{j\omega T})$ 由参考、期望信号的相干函数 $\gamma_{xd}^2(e^{j\omega T})$ 决定,相干函数值越大,理论上能达到的降噪量越大。在某频率点要超过10 dB的降噪量,需相干函数 $\gamma_{xd}^2(e^{j\omega T}) \geq 0.9$;要超过20 dB降噪量,则需相干函数 $\gamma_{xd}^2(e^{j\omega T}) \geq 0.99$ 。

前馈控制模式中,参考、误差信号的相干函数容易在一些频率处减弱,一方面是由于DSP系统采集到的参考和期望信号事实上是真实信号叠加上两个输入通道的电路底噪,这在一定程度上影响了二者的相关程度;更主要的则是由于传声器布放在初级噪声场中某些频率信号的波节位置,导致参考、期望信号在这些频率点信噪比降低,相关程度较差。图8计算了宽带线谱复合噪声下前馈模式的参考、期望信号的相干函数。对比观察图6,降噪曲线中存在的一些降噪量不足的频率点,均对应了图8中相干函数值较小的频率。例如51 Hz处相干函数值为0.16,降噪量不足1 dB;220 Hz处相干函数值为0.45,降噪量不足3 dB;668 Hz处相干函数值为0.48,降噪量不足4 dB,符合式(10)的描述。

图7混合控制模式中加入反馈控制后将上述三个频率点的降噪量分别提高到11.7 dB、3.2 dB、6.5 dB。反馈控制只有一个误差传声器,不存在参考、期望信号的相干性问题,提高了前馈控制中相干性差的频率点的降噪量,使得混合控制模式性能整体优于前馈控制模式。

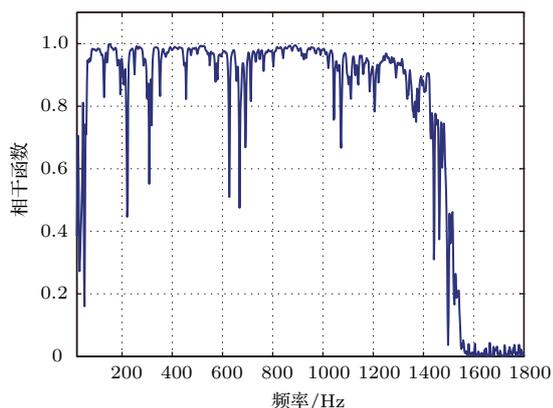


图8 前馈模式参考与期望信号相干函数

Fig. 8 Coherence of reference signal and desired signal under feedforward control

4 综合设计方法对性能的提高

仿真和实验采用前馈控制模式,白噪声经过20~800 Hz低通滤波后作为初级噪声。仿真中设定噪声源方位分别位于 0° 、 45° 、 135° 、 180° ,四个角度对应的参考通道、初级通道、次级通道、次级声反馈通道在消声室中测试得到。综合最优控制器的设计采用2.2节的方法进行。首先通过白噪声离线辨识次级通道、次级声反馈通道;之后,音箱产生初级噪声并依次置于耳机的四个入射方位,参考和误差传声器分别采集四个角度下的参考信号 $x(n)$ 和期望信号 $d(n)$,计算自相关矩阵 R_i 和互相关向量 p_i ;最后根据式(8)即可得到综合最优的控制系数。

表1仿真得到了各角度最优控制器的控制增益;使用其它角度控制器的控制增益,其中噪声方位为 0° 、 45° 时,使用 180° 噪声下设计的控制器,噪声方位为 135° 、 180° 时,使用 0° 噪声下设计的控制器,表中暂称为“失配控制增益”;使用综合最优控制器的控制增益。

表1 前馈模式多角度降噪效果仿真对比表
Table 1 Simulation performance of feedforward noise control under multi-degree noise

噪声入射角度	最优控制增益 (dB)	失配控制增益 (dB)	综合最优控制增益 (dB)
0°	22.8	6.3	14.0
45°	22.0	6.6	14.9
135°	18.2	8.7	12.4
180°	14.5	6.1	8.8

表2则通过四个角度的噪声控制增益之和来说明综合最优方法对性能的提高。使用式(3)方法设

计各角度下的最优控制器和式(8)方法设计的综合最优控制器,依次控制四个角度的噪声,对控制增益之和进行对比。表2中可以看出综合设计方法对四个角度的噪声控制增益之和最大,总体控制效果最优。

表2 前馈模式多角度降噪量之和仿真对比表
Table 2 Simulation sum of feedforward noise control under multi-degree noise

不同角度控制器	四角度控制增益之和 (dB)
0° 控制器	47.5
45° 控制器	46.6
135° 控制器	38.7
180° 控制器	35.7
综合设计控制器	50.1

为了更直观展现综合设计方法对降噪曲线的改善,选取初级噪声源位于耳机 0° 时的数据绘图,见图9。图9中 0° 噪声下设计的维纳滤波器得到最优控制, 180° 噪声下设计的维纳滤波器得到失配控制,式(8)方法设计的维纳滤波器得到综合最优控制。

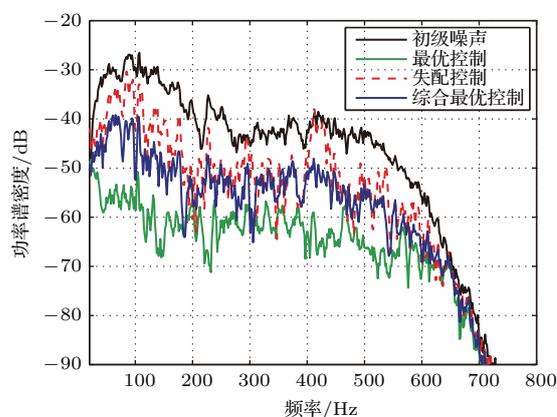
图9 噪声 0° 入射时前馈控制效果仿真

Fig. 9 Simulation performance of feedforward control under 0 degree noise

实验测试在普通房间中进行,结果见表3。初级噪声源位于耳机 0° 时的降噪曲线对比见图10,图10中三条曲线分别为误差传声器测得的初级噪声,使用 180° 噪声下设计的维纳滤波器得到的失配残留噪声,使用综合最优设计的维纳滤波器的残留噪声。

从图10可以明显看出,当噪声源方位和控制器系数失配时,耳机的降噪性能会急剧下降,在某些频率点如610 Hz处甚至会增加噪声功率。从降噪曲线上看,使用式(8)的滤波器综合设计方法对降噪性

能有5~10 dB的改善；从控制增益上来看，各角度的噪声控制增益大幅度提升，总体降噪效果最优，在普通声学环境中，优化后的效果接近最优控制效果。

表3 前馈模式多角度降噪效果对比表

Table 3 Performance of feedforward noise control under multi-degree noise

噪声入射角度	最优控制增益 (dB)	失配控制增益 (dB)	综合最优控制增益 (dB)
0°	12.5	7.3	12.3
45°	14.5	6.1	12.4
135°	12.1	7.1	11.6
180°	14.4	10.2	13.7

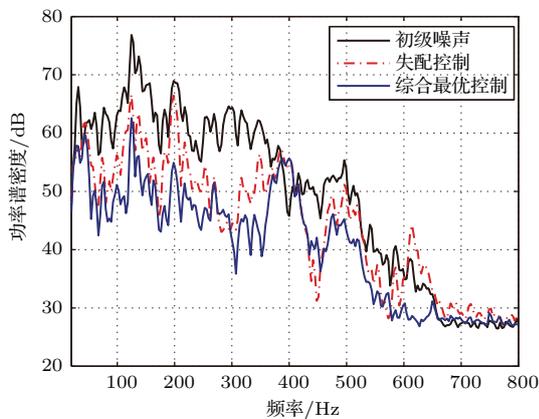


图10 噪声0°入射时噪声控制效果

Fig. 10 Control performance of feedforward control under 0 degree noise

5 结论

基于复杂度和稳定性的考虑，本文实现了固定系数控制器的数字ANC耳机。为了提高噪声控制性能，采用前反馈混合控制器，得到了控制器的设计方法。通过仿真和实验对比研究了前馈控制模式和混合控制模式的噪声控制性能，结果表明，混合控制模式结合了前馈和反馈模式的优势，在相同的宽带噪声下，混合模式的降噪量更大，降噪曲线更加平滑，一些前馈模式无法控制的频率点也得到了较好的控制。噪声入射角度变化时，采用固定系数控制器的ANC耳机降噪性能会出现急剧下降，针对该问题提出了一种综合最优控制器的设计方法，仿真和实验表明噪声入射角度变化时，这种方法对各频率点的降噪量有5~10 dB的提升。将来的工作包括

ANC耳机中的低复杂度自适应算法的研究与实现，次级通道差异性问题的解决。

参考文献

- [1] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 5275.
- [2] KUO S M, MORGAN D R. Active noise control systems: Algorithms and DSP implementations[M]. New York: Wiley, 1996: 54-75.
- [3] RANJAN R, GAN W S. Natural listening over headphones in augmented reality using adaptive filtering techniques[J]. Audio, Speech, and Language Processing, IEEE/ACM Transactions on 2015, 23(11): 1988-2002.
- [4] SCHOBEN D W E, AARTS R M. Personalized multi-channel headphone sound reproduction based on active noise cancellation[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2005, 91(3): 440-450.
- [5] SONG Y, GONG Y, KUO S M. A robust hybrid feedback active noise cancellation headset[J]. Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, 2005, 13(4): 607-617.
- [6] KUO S M, MITRA S, GAN W S. Active noise control system for headphone applications[J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2006, 14(2): 331-335.
- [7] FOO S W, SENTHILKUMAR T N, AVERTY C. Active noise cancellation headset[C]. Circuits and Systems, 2005 ISCAS 2005. IEEE International Symposium on. IEEE, 2005: 268-271.
- [8] SCHUMACHER T, KRÜGER H, JEUB M, et al. Active noise control in headsets: A new approach for broadband feedback ANC[C]. Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 417-420.
- [9] CHANG C Y, LI S T. Active noise control in headsets by using a low-cost microcontroller[J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2011, 58(5): 1936-1942.
- [10] WU L, QIU X, GUO Y. A simplified adaptive feedback active noise control system[J]. Applied Acoustics, 2014, 81(6): 40-46.
- [11] RAFAELY B, JONES M. Combined feedback-feedforward active noise-reducing headset—The effect of the acoustics on broadband performance[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(3): 981-989.
- [12] ZHANG L, QIU X. Causality study on a feedforward active noise control headset with different noise coming directions in free field[J]. Applied Acoustics, 2014, 80(5): 36-44.
- [13] 赵剑. 自适应有源噪声控制算法中的次级通道问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [14] ELLIOTT S J. Signal processing for active noise control[M]. London U. K.: Academic, 2001.