

基于频域前馈自适应算法的车内噪声主动控制 仿真与试验分析

王 健^{1*} 张 明¹ 刘 松¹ 权 贺¹ 冯 超¹ 张 喆²

1. 中国重型汽车集团有限公司汽车研究总院, 济南, 250000

2. 中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津, 300300

摘要: 针对目前广泛应用于车内噪声主动控制领域的时域前馈自适应算法(TFxLMS)存在计算量大、收敛速度慢、稳定性差等问题, 基于快速傅里叶变换与分块计算思想提出了一种频域前馈自适应算法(FFxLMS)。通过数值仿真比较了 FFxLMS 算法和 TFxLMS 算法在降噪效果及计算量、收敛速度、稳定性等方面的性能优劣, 并通过实车路试验证了仿真结果。对比显示, FFxLMS 算法降噪效果更明显、计算量更小、收敛速度更快且稳定性更好。

关键词: 车内噪声主动控制; 频域前馈自适应算法; 降噪; 计算量; 收敛速度; 稳定性

中图分类号: U467

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation and Experimental Analysis for Active Vehicle Interior Noise Control Based on FFxLMS

WANG Jian^{1*} ZHANG Ming¹ LIU Song¹ QUAN He¹ FENG Chao¹ ZHANG Zhe²

1. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan, 250000

2. CATARC(Tianjin) Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Tianjin, 300300

Abstract: In view of the problems such as huge computational counts, low convergence speed and poor stability of the widely-used time-domain feedforward adaptive algorithm(TFxLMS) for active vehicle interior noise control, a FFxLMS was proposed based on fast Fourier transform(FFT) and block computation. The strengths and weaknesses of the FFxLMS algorithm and the TFxLMS algorithm were compared in terms of the noise reduction, computational count, convergence speed, and stability. Furthermore, the numerical findings were experimentally validated. The results show that the FFxLMS algorithm has advantages in noise reduction, computational count, convergence speed and stability.

Key words: active vehicle interior noise control; frequency-domain feedforward adaptive algorithm(FFxLMS); noise reduction; computational count; convergence speed; stability

0 引言

汽车车内噪声是评价车型性能的关键指标之一。当前, 针对车内噪声的控制方法主要分为被动噪声控制(passive noise control, PNC)和主动噪声控制(active noise control, ANC)。其中, PNC 技术相对成熟且成本低廉, 如铺设吸隔声材料、使用隔振器等 PNC 技术已被广泛应用, 但其工作频段相对固定, 导致降噪效果不甚理想(低频尤为明显), 而且引入较多的附加质量不符合汽车轻量化的发展趋势; 而 ANC 技术则基于“以声消声”的思想, 通过次级声源播放与目标噪声幅值相等、相位相反的抗噪声来实时抵消目标噪声^[1-7]。ANC 技术在低频的降噪效果良好, 而且可以复用

车内扬声器、麦克风等设备, 不会增加太多的成本与附加质量, 有效弥补了 PNC 技术的固有缺陷。

目前, 基于时域前馈自适应算法(TFxLMS)的 ANC 技术凭借其结构简单、计算复杂度低、对稳态和非稳态信号鲁棒性均较好等优点, 被广泛应用于车内噪声控制领域。与 PNC 技术相比, ANC 技术在中低频范围内的降噪效果得到了显著提高^[8-15]。但 TFxLMS 算法也存在计算量大、收敛速度慢、稳定性差等缺点。上述缺点导致 TFxLMS 算法对路噪等随机宽频噪声的控制效果不甚理想, 难以满足消费者对 ANC 技术的期许。

针对 TFxLMS 算法的缺点, 研究人员尝试开发变换域 LMS 算法(TDLMS)对其进行改进^[16-19]。LEE 等^[17]利用包括离散傅里叶变换(DFT)在内的一系列正交离散变换方法对 LMS

算法进行了改进,证明了在不同域内的维纳解保持一致,而 TDLMS 算法的收敛速度更快。然而,现有的 TDLMS 算法未考虑扬声器到误差麦克风之间的次级路径,因而无法直接应用于车内噪声主动控制,且 DFT 等变换方法的计算效率不高,给车载主动降噪等多输入多输出系统(MIMO)带来了较大的计算压力。

为了能够将 TDLMS 算法应用于车内噪声主动控制领域,本文基于快速傅里叶变换(FFT)与分块计算思想开发了频域前馈自适应算法(FFx-LMS)。与 TFxLMS 算法相比,FFxLMS 算法用分块计算代替了逐点计算,并用频域相乘代替了时域卷积计算,理论上可以减小计算量,加快计算速度。为了比较两种算法在车内噪声主动控制领域的性能优劣,本文以路噪为降噪对象,通过数值仿真比较了两种算法在降噪效果及计算量、收敛速度、稳定性等方面的表现,并通过实车路试对仿真结果进行了验证。

1 TFxLMS 算法

图 1 所示为 TFxLMS 算法的基本原理。假设系统里共有 M 个扬声器、 L 个误差麦克风和 K 个参考信号。在时刻 n 参考信号 \mathbf{x} 经初级路径 \mathbf{P} 后,在误差麦克风处形成原始噪声 \mathbf{d} 。为了对 \mathbf{d} 进行抵消,利用滤波器组 \mathbf{H} 对 \mathbf{x} 进行滤波处理形成抗噪声信号,经过次级路径 \mathbf{C} 后,在误差麦克风处形成 $\hat{\mathbf{d}}$ 。 $\hat{\mathbf{d}}$ 与原始噪声 \mathbf{d} 叠加产生误差信号 \mathbf{e} :

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \hat{\mathbf{d}}(n) \quad (1)$$

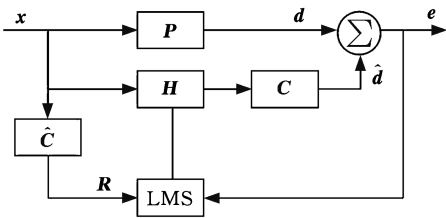


图 1 TFxLMS 算法框图

Fig.1 Block diagram of the TFxLMS algorithm

为了让误差信号趋于最小,需要实时(逐点)更新控制滤波器组系数:

$$\mathbf{H}(n+1) = \mathbf{H}(n) + 2\alpha_0 \mathbf{R}(n) \quad (2)$$

其中, α_0 为步进系数; \mathbf{R} 为前向滤波后的参考信号矩阵,大小为 $L \times IMK$ (I 为控制滤波器组 \mathbf{H} 的阶数),其元素可表示为

$$r_{lmk}(n) = \sum_{j=0}^{J-1} \hat{c}_{lmj} x_k(n-j) \quad (3)$$

式中: \hat{c}_{lm} 为第 m 个扬声器到第 l 个误差麦克风之间的次级路径传递函数估计值; J 为传递函数阶数。

由式(2)可见,TFxLMS 算法的控制滤波器组系数需要逐点更新,导致算法计算量较大。

2 FFxLMS 算法

同样假设系统里有 M 个扬声器、 L 个误差麦克风和 K 个参考信号,控制滤波器组 \mathbf{H} 的阶数为 I ,次级路径传递函数阶数为 J 。对参考信号进行分块处理,具体方法为:在时刻 n 取出第 k 个参考信号 \mathbf{x}_k 中最近的 $2I+J$ 个数据点,将其以 50% 的重叠率等分成 $2I/J$ 个分块,其中第 i 个分块可以表示为

$$\mathbf{x}_k^T(n_i) = [x_k(n-2I+(i-2)J+1) \quad x_k(n-2I+(i-2)J+2) \quad \cdots \quad x_k(n-2I+iJ)]_{1 \times 2J} \quad (4)$$

对该分块进行前向滤波,这里以第 m 个扬声器到第 l 个误差麦克风之间的传递函数估计值 \hat{c}_{lm} 为例,经前向滤波可得

$$\mathbf{r}_{lmk}(n_i) = \text{Re}\{\text{ifft}[\text{fft}[\mathbf{x}_k^T(n_i)] \otimes \text{fft}[\hat{c}_{lm} \quad \underbrace{0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0}_{\text{共 } J \text{ 个}}]]\}_{1 \times 2I} \quad (5)$$

其中, fft 和 ifft 分别表示快速傅里叶变换与逆快速傅里叶变换,取后 J 个数作为结果, Re 表示取实部, \otimes 表示 Hadamard 乘法,即

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & a_{14} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{13} & b_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{12}b_{12} \\ a_{13}b_{13} & a_{14}b_{14} \end{bmatrix}$$

将所有 $2I/J$ 个分块的前向滤波结果首尾拼接可得

$$\mathbf{r}_{lmk}^T(n) = [\mathbf{r}_{lmk}(n_1) \quad \mathbf{r}_{lmk}(n_2) \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{lmk}(n_{2I/J})]_{1 \times 2I} \quad (6)$$

进一步可得所有针对第 l 个误差麦克风的前向滤波结果

$$\mathbf{r}_l^T(n) = [\mathbf{r}_{l11}^T(n) \quad \mathbf{r}_{l21}^T(n) \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{lM1}^T(n) \quad \mathbf{r}_{l12}^T(n) \quad \mathbf{r}_{l22}^T(n) \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{lM2}^T(n) \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{l1K}^T(n) \quad \mathbf{r}_{l2K}^T(n) \quad \cdots \quad \mathbf{r}_{lMK}^T(n)]_{1 \times 2IMK} \quad (7)$$

最终得到完整的前向滤波结果

$$\mathbf{R}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^T(n) \\ \mathbf{r}_2^T(n) \\ \vdots \\ \mathbf{r}_L^T(n) \end{bmatrix}_{L \times 2IMK} \quad (8)$$

引入控制滤波器组 \mathbf{H} 的系数:

$$\mathbf{h}'(n) = [\mathbf{h}'_{11}(n) \quad \mathbf{h}'_{21}(n) \quad \cdots \quad \mathbf{h}'_{M1}(n) \quad \mathbf{h}'_{12}(n) \quad \mathbf{h}'_{22}(n) \quad \cdots \quad \mathbf{h}'_{M2}(n) \quad \cdots \quad \mathbf{h}'_{1K}(n) \quad \mathbf{h}'_{2K}(n) \quad \cdots \quad \mathbf{h}'_{MK}(n)]_{1 \times 2IMK} \quad (9)$$

$$\mathbf{h}'_{mk}(n) = [\underbrace{h_{mk}(0) \quad h_{mk}(1) \quad \cdots \quad h_{mk}(I-1)}_{\mathbf{h}_{mk}(n)} \quad \underbrace{0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0}_{\text{共 } I \text{ 个}}]_{1 \times 2I} \quad (10)$$

将滤波器组 \mathbf{H} 作用于前向滤波后的参考信号 \mathbf{R} ,得到误差麦克风处的响应信号:

$$\hat{\mathbf{d}}(n)_{L \times I} = \hat{\mathbf{d}}'(n)_{L \times 2I}(:, I+1: \text{end}) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{d}}'(n) = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\mathbf{r}_{1mk}^T(n)] \otimes \text{fft}[\mathbf{h}'_{mk}(n)]]) \\ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\mathbf{r}_{2mk}^T(n)] \otimes \text{fft}[\mathbf{h}'_{mk}(n)]]) \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\mathbf{r}_{Lmk}^T(n)] \otimes \text{fft}[\mathbf{h}'_{mk}(n)]]) \end{bmatrix}_{L \times 2I} \quad (12)$$

其中, $(:, I+1: \text{end})$ 表示取矩阵的后 I 列。

引入误差麦克风处的原始噪声信号:

$$\mathbf{d}(n) = \begin{bmatrix} d_1(n-2I+1) & d_1(n-2I+2) & \cdots & d_1(n) \\ d_2(n-2I+1) & d_2(n-2I+2) & \cdots & d_2(n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_L(n-2I+1) & d_L(n-2I+2) & \cdots & d_L(n) \end{bmatrix}_{L \times 2I} \quad (13)$$

可得误差信号:

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{d}(n) - \hat{\mathbf{d}}(n) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1(n) \\ \mathbf{e}_2(n) \\ \vdots \\ \mathbf{e}_L(n) \end{bmatrix}_{L \times I} \quad (14)$$

基于最小二乘原理对控制滤波器组系数进行更新:

$$\mathbf{h}(n+2I) = \mathbf{h}(n) + 2\alpha_0 \mathbf{e}_r(n) \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}(n) \\ \mathbf{h}_{22}(n) \\ \vdots \\ \mathbf{h}_{MK}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{11}(n) & \mathbf{h}_{21}(n) & \cdots & \mathbf{h}_{M1}(n) & \mathbf{h}_{12}(n) \\ \mathbf{h}_{22}(n) & \cdots & \mathbf{h}_{M2}(n) & \cdots & \mathbf{h}_{1K}(n) & \mathbf{h}_{2K}(n) & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{h}_{MK}(n) \end{bmatrix}_{1 \times IMK} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_r(n) = & \left[\sum_{l=1}^L \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\underbrace{0 \ 0 \ \cdots \ 0}_{\text{共}I\text{个}} \ \mathbf{e}_l(n)] \otimes \right. \\ & \left. \text{conj}[\text{fft}[\mathbf{r}_{l11}(n)]]] \right) \sum_{l=1}^L \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\underbrace{0 \ 0 \ \cdots \ 0}_{\text{共}I\text{个}} \\ & \mathbf{e}_l(n)] \otimes \text{conj}[\text{fft}[\mathbf{r}_{l21}(n)]]] \right) \cdots \\ & \left. \sum_{l=1}^L \text{Re}(\text{ifft}[\text{fft}[\underbrace{0 \ 0 \ \cdots \ 0}_{\text{共}I\text{个}} \ \mathbf{e}_l(n)] \otimes \right. \\ & \left. \text{conj}[\text{fft}[\mathbf{r}_{lMK}(n)]]] \right) \right]_{1 \times IMK} \quad (17) \end{aligned}$$

式中: conj 表示取复数共轭, 每个快速傅里叶变换均取结果的前 I 个数进行后续计算。

为了增强算法对参考信号的适应性, 对步进系数进行归一化处理, 即

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{2I/I} \mathbf{x}_k^T(n_i) \mathbf{x}_k(n_i)} \quad (18)$$

其中, α 为名义步进系数, 为便于区分, 后文称 α_0 为实际步进系数。

对比式(2)和式(15)可见, TFxLMS 算法为逐点更新控制滤波器组系数, 而 FFxLMS 算法则

通过分块计算实现逐块更新, 每 $2I$ 个时刻共用一组控制滤波器组系数, 因而大幅减小了计算量。

3 FFxLMS 算法与 TFxLMS 算法的性能对比

通过数值仿真, 从降噪效果及计算量、收敛速度、算法稳定性等方面比较 FFxLMS 与 TFxLMS 算法的性能优劣。数值仿真中使用在某车型上实际采集到的时长 30 s 的参考信号及原始噪声信号作为算法输入。该车的路噪主动控制系统采用局部控制策略, 系统包含 2 个扬声器、2 个误差麦克风及 31 个通道的参考信号。需要说明的是, 本文以仿真结果中最后 5 s 的数据计算降噪量, 以计算用时来评估计算量(后文中, 用 II 代表式(4)~式(18)中的 $2I$, 用 JJ 代表 $2J$)。

3.1 降噪效果及计算量

1) 保持 II 、 JJ 的大小不变(均取 128), 改变 α 的取值($\alpha = 1, 2, 3$), 比较两种算法的降噪效果(降噪量 ΔL_p) 和计算量(计算用时 t), 如图 2 所示。由图 2 可见, 同等条件下 FFxLMS 算法比 TFxLMS 算法降噪效果略好, 且计算量仅为后者的一半左右。

2) 保持 α 的取值($\alpha = 1$) 及 JJ 的大小($JJ = 128$) 不变, 改变 II 的大小(始终满足 $2II = N_x JJ$, N 为正整数), 比较降噪效果和计算量(计算用时), 结果如图 3 所示。对比图 3 及图 2a 可见, II 越小, 降噪效果越好, 但计算量相应增大。

3) 保持 α 的取值($\alpha = 1$) 及 II 的大小($II = 128$) 不变, 改变 JJ 的大小(始终满足 $2II = N \times JJ$, N 为正整数), 比较降噪效果 ΔL_p 和计算量 t , 结果如图 4 所示。对比图 4 及图 2a 可见, JJ 的大小对降噪效果和计算量的影响不大。

3.2 收敛速度

本文通过误差信号的时间历程来评估算法的收敛速度。根据前述仿真结果, 针对本文的仿真对象, 不论是使用 FFxLMS 算法还是 TFxLMS 算法, 降噪效果都集中在 70 ~ 170 Hz、200 ~ 250 Hz 以及 330 ~ 430 Hz 等三个频段内。此处以 330 ~ 430 Hz 频段为例, 通过计算每一秒内的降噪量来比较两种算法的收敛速度, 结果如图 5 所示。由图 5 可见, FFxLMS 算法的收敛速度更快。

3.3 算法稳定性

次级路径传递函数的建模估计误差经常引发算法失效。本文对原始次级路径传递函数在 330 ~ 430 Hz 施加 10 dB 的带阻滤波, 模拟传递函数的估计误差, 并在 FFxLMS 算法和 TFxLMS 算法

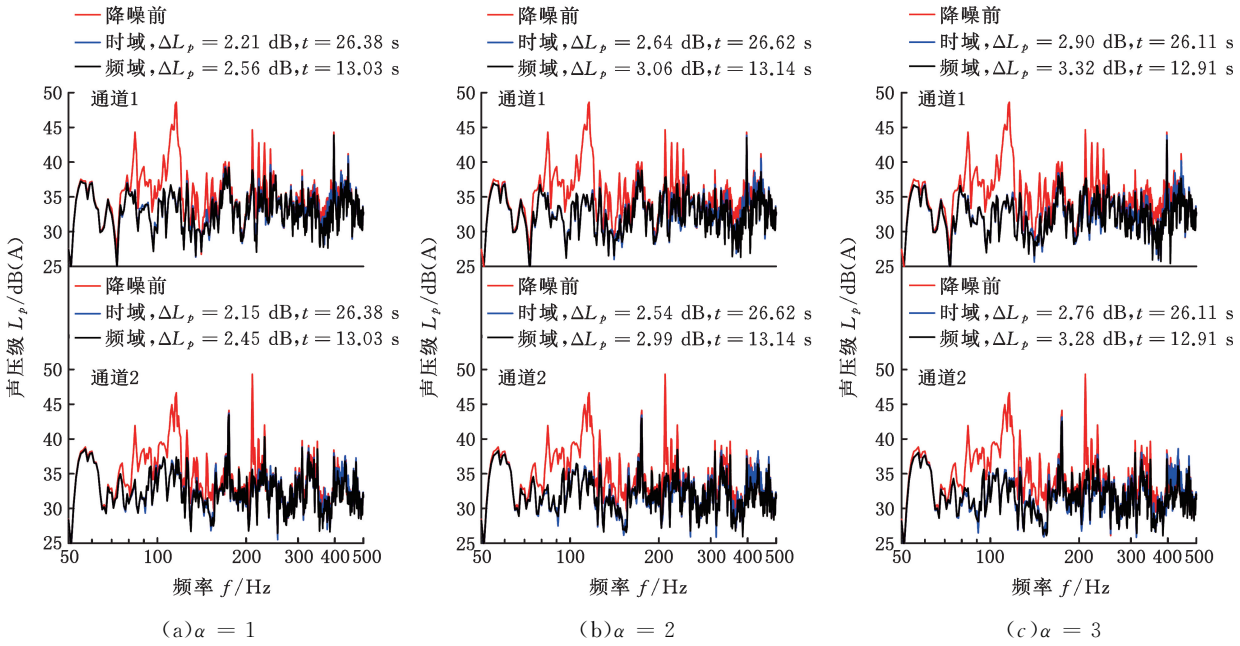


图2 降噪效果及计算量仿真结果($II = 128, JJ = 128$)

Fig.2 Simulation results of noise reduction effect and computational complexity($II = 128, JJ = 128$)

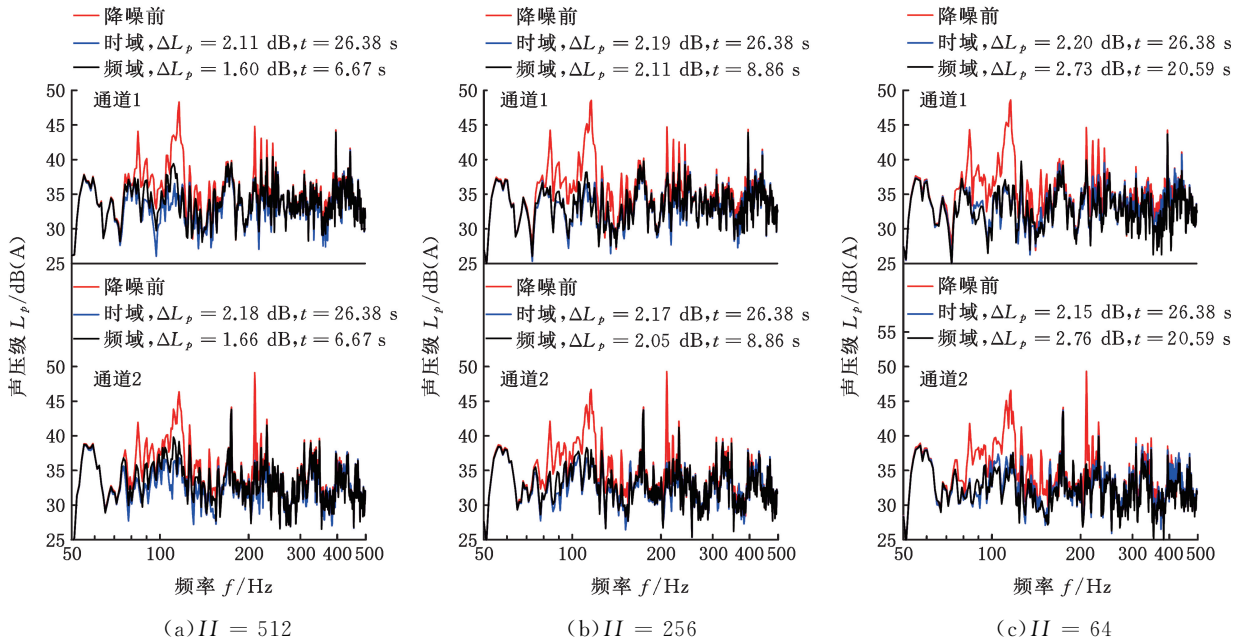


图3 降噪效果及计算量仿真结果($\alpha = 1, JJ = 128$)

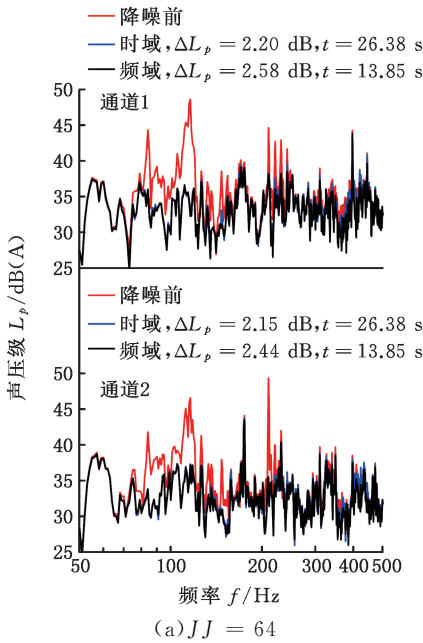
Fig.3 Simulation results of noise reduction effect and computational complexity($\alpha = 1, JJ = 128$)

参考信号前向滤波计算中(式(3)和式(5))使用此带阻滤波后的传递函数,以此来评估传递函数估计有延时两种算法的稳定性,结果如图6所示。对比图6和图2a可见,两种算法的降噪效果均有所下降,但都没有明显的发散迹象。FFxLMS算法下降得更多,但其降噪效果仍优于TFxLMS算法。

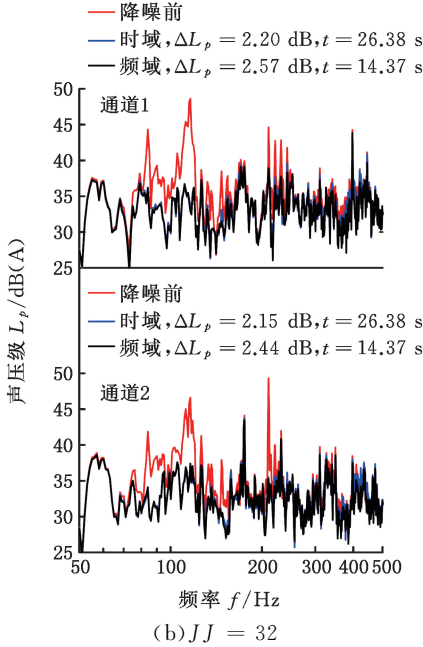
4 实车验证

为了进一步验证 TFxLMS 算法和 FFxLMS

算法的性能优劣,本文开展了实车路试。所用试验车辆为某型号普通 A 级乘用车。车辆底盘布置多个单向与三向加速度传感器,经参考信号寻优后共采集 12 个通道的加速度信号作为参考信号;车辆内部布置 4 个误差麦克风,位于各座椅头枕上采集误差信号;使用四车门中低音扬声器和后备箱低音炮播放抗噪声(实车及部分传感器布置照片见图 7,传感器型号及关键性能参数见表 1,扬声器品牌及关键性能参数见表 2)。试验中,分别测试了车辆在某粗糙路面上以 60 km/h 的速



(a) $JJ = 64$



(b) $JJ = 32$

图 4 降噪效果及计算量仿真结果 ($\alpha = 1, II = 128$)

Fig.4 Simulation results of noise reduction effect and computational complexity ($\alpha = 1, II = 128$)

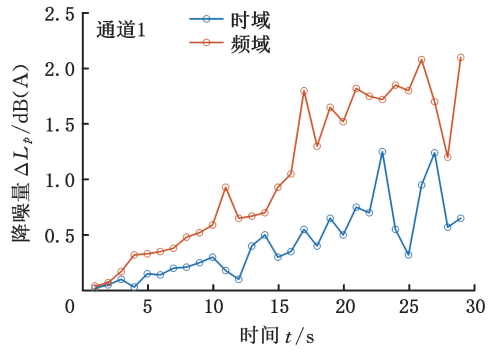
度匀速行驶时两种算法的表现。两种算法核心参数如下： $\alpha = 1, II = 128, JJ = 128$ 。

4.1 降噪效果

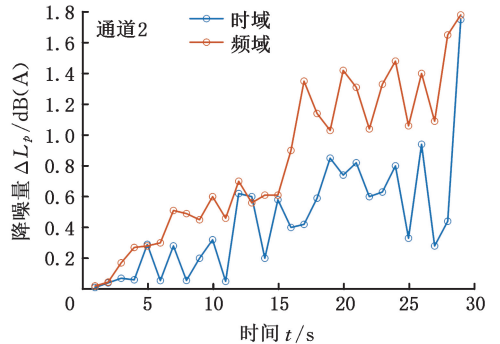
图 8 对比了两种算法在主驾外耳位置处的降噪效果,FFxLMS算法比TFxLMS算法降噪量约大 1.4 dB。

4.2 收敛速度

图 9 对比了两种算法在主驾外耳位置处的降噪量时间历程,FFxLMS算法在约 15 s 后降噪效果达到稳定状态,降噪量约 5 dB;而TFxLMS算法在 20 s 时仍然处于未稳定状态,且降噪量比FFxLMS算法小约 1.5 dB。



(a) $\alpha = 3, II = 128, JJ = 128, 330 \sim 430 \text{ Hz}$



(b) $\alpha = 3, II = 128, JJ = 128, 330 \sim 430 \text{ Hz}$

图 5 收敛速度仿真结果

Fig.5 Simulation results of convergence speed

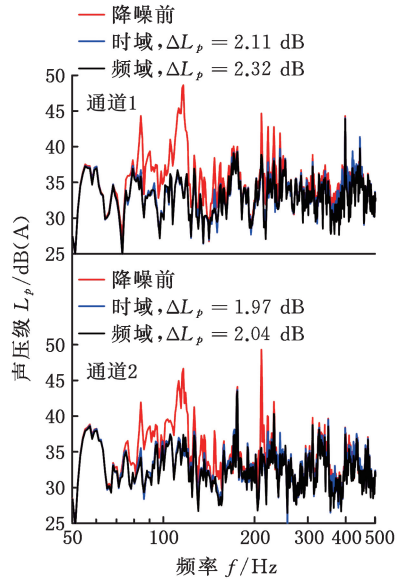


图 6 算法稳定性仿真结果

($\alpha = 1, II = 128, JJ = 128$)

Fig.6 Simulation results of algorithm stability

($\alpha = 1, II = 128, JJ = 128$)



图 7 部分传感器照片

Fig.7 Photographs of some sensors

表 1 传感器型号及关键性能参数

Tab.1 Sensor model and key performance parameters

类型	品牌	型号	灵敏度
误差麦克风	Brüel & Kjaer	BK-4958-A	分别为 10.91 mV/Pa, 10.19 mV/Pa, 8.88 mV/Pa, 10.45 mV/Pa
加速度传感器	PCB PIEZO-TRONICS	356A33	分别为 1.042 m/s ² , 1.027 m/s ² , 1.03 m/s ² , 0.977 m/s ² , 1.054 m/s ² , 1.04 m/s ² , 1.052 m/s ² , 1.056 m/s ² , 1.081 m/s ²
		356A15	分别为 10.23 m/s ² , 10.4 m/s ² , 10.34 m/s ²

表 2 作动器(扬声器)型号及关键性能参数

Tab.2 Loudspeaker model and key performance parameters Hz

扬声器类型	品牌	频响范围
中高频扬声器	SONY	70~20000
低音扬声器		40~200

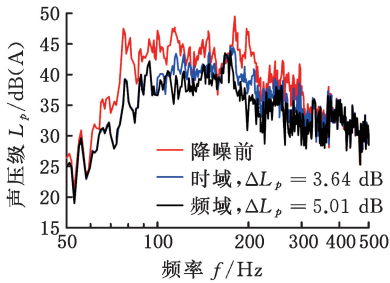


图 8 正常状态主驾外耳降噪效果对比

Fig.8 Comparison of noise reduction effect for the driver's side outer ear in normal state

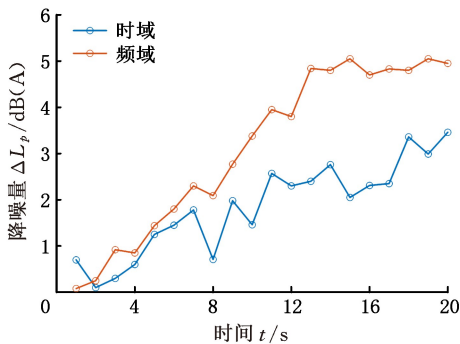


图 9 正常状态主驾外耳降噪量时间历程

Fig.9 Time history of noise reduction level for the driver's side outer ear in normal state

4.3 算法稳定性

为了验证算法稳定性,将主驾座椅向前移动约 5 cm,以此改变次级路径传递函数(算法中仍使用未移动座椅时测得的次级路径传递函数)。图 10 对比了在此情况下两种算法在主驾外耳位置处的降噪效果,FFxLMS 算法比 TFxLMS 算法降噪量约大 1.7 dB。

5 结论

1)FFxLMS 算法比 TFxLMS 算法降噪效果

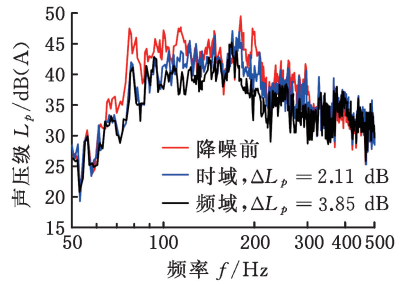


图 10 特殊状态(移动主驾座椅)主驾外耳降噪效果对比

Fig.10 Comparison of noise reduction effect for the driver's side outer ear under special conditions (adjusting the driver's seat)

更好,且计算量更小。

2)FFxLMS 算法中控制滤波器的阶数越低,降噪效果越好,但计算量随之增大。

3)FFxLMS 算法中次级路径传递函数的阶数对降噪效果和计算量的影响不大。

4)FFxLMS 算法相较于 TFxLMS 算法的收敛速度更快。

5)当次级路径传递函数估计有误时,FFxLMS 算法和 TFxLMS 算法的降噪效果均有所下降,但 FFxLMS 算法的降噪效果仍优于 TFxLMS 算法。

参考文献:

[1] 李卓林, 马令坤, 冯智睿. 双通道室内主动降噪器设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 108-115. LI Zhuolin, MA Lingkun, FENG Zhirui. Design of Dual-channel Indoor Active Noise Reducer[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(31): 108-115.

[2] LOPES P A C. Active Noise Control Algorithms with Reduced Channel Count and Their Stability Analysis[J]. Signal Processing, 2008, 88(4): 811-821.

[3] 李长林, 赵威, 宋卓夫, 等. 变压器噪声消除技术研究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(5): 421-424. LI Changlin, ZHAO Wei, SONG Zhuofu, et al. Research on Transformer Noise Elimination Technology[J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(5): 421-424.

[4] HANG S, WANG Y S, GUO H, et al. A Normalized Frequency Domain Block Filtered-x LMS Algorithm for Active Vehicle Interior Noise Control[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 150-165.

[5] LEE S-K, LEE S, BACK J, et al. A New Method for Active Cancellation of Engine Order Noise in a

- Passenger Car[J]. Applied Sciences, 2018, 8: 1394.
- [6] 伍彩云, 唐健, 秦素梅, 等. 噪声主动控制的进展及趋势[J]. 沈阳工业学院学报, 2002, 21(1): 30-35.
WU Chaiyun, TANG Jian, QIN Sumei, et al. Progress and Trends in Active Noise Control[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 2002, 21(1): 30-35.
- [7] 徐永成, 温熙森, 陈循, 等. 有源消声技术与应用述评[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(2): 119-124.
XU Yongcheng, WEN Xishen, CHEN Xun, et al. Review of Active Noise Cancellation Technology and Its Applications[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(2): 119-124.
- [8] CHEER J, ELLIOTT S J. Multichannel Control Systems for the Attenuation of Interior Road Noise in Vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60/61: 753-769.
- [9] 王国领, 许国贤, 连小珉, 等. 车内有源噪声控制的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(4): 23-26.
WANG Guoling, XU Guoxian, LIAN Xiaomin, et al. Research on Active Noise Control Inside Vehicles[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1996, 36(4): 23-26.
- [10] 胡啸, 胡爱群, 涂有超. 机动车辆室内复合主动噪声控制系统的设计[J]. 噪声与振动控制, 2001, 21(1): 8-12.
HU Xiao, HU Aiqun, TU Youchao. Design of Compound Active Noise Control System for Motor Vehicle Interior[J]. Noise and Vibration Control, 2001, 21(1): 8-12.
- [11] 张立军, 张希玉, 孟德建. 基于NFXLMS算法的车内道路噪声主动控制系统[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 173-178.
ZHANG Lijun, ZHANG Xiyu, MENG Dejian. Active Control System for Road Noise Inside Vehicles Based on NFXLMS Algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 173-178.
- [12] 郑森, 史晨路, 吕晓, 等. 多重相干分析法结合OTPA技术在汽车路噪主动控制中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(11): 49-57.
ZHENG Sen, SHI Chenlu, LYU Xiao, et al. Application of Multiple Coherence Analysis Combined with OTPA Technology in Active Control of Automobile Road Noise[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 35(11): 49-57.
- [13] 张程鹏, 张士强, 李浩, 等. 车内发动机噪声主动降噪辨识方法及DSP实现[J]. 汽车实用技术, 2023(8): 107-112.
ZHANG Chengpeng, ZHANG Shiqiang, LI Hao, et al. Identification Method and DSP Implementation of Active Noise Reduction for Engine Noise Inside Vehicles[J]. Automobile Applied Technology, 2023(8): 107-112.
- [14] 张楠, 李彦奇, 邓伟, 等. 基于主动降噪技术汽车降噪头枕应用及研究[J]. 汽车电器, 2023(3): 43-44.
ZHANG Nan, LI Yanqi, DENG Wei, et al. Application and Research of Automobile Noise Reduction Headrest Based on Active Noise Reduction Technology[J]. Automotive Electrical Appliances, 2023(3): 43-44.
- [15] 王理周, 陈祥君, 张斌, 等. 某车型路噪主动降噪开发[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(2): 147-151.
WANG Lizhou, CHEN Xiangjun, ZHANG Bin, et al. Development of Active Noise Reduction for Road Noise in a Certain Vehicle Model[J]. Automobile Applied Technology, 2023, 48(2): 147-151.
- [16] MORGAN D R, THI J C. A Delayless Subband Adaptive Filter Architecture[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(8): 1819-1830.
- [17] LEE J C, UN C W. Performance of Transform-domain LMS Adaptive Digital Filters[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1986, 34(3): 499-510.
- [18] 王晓君, 薛琳博, 王彦朋. 基于小波包变换及TRLMS抑制脉冲干扰的方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021(5): 858-863.
WANG Xiaojun, XUE Linbo, WANG Yanpeng. A Method for Suppressing Impulse Interference Based on Wavelet Packet Transform and TR-LMS[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021(5): 858-863.
- [19] 张盛楠, 杨书华, 赵巍, 等. 基于数字滤波技术的激光通信干扰信号辨识研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(10): 153-156.
ZHANG Shengnan, YANG Shuhua, ZHAO Wei, et al. Research on Identification of Laser Communication Interference Signals Based on Digital Filtering Technology[J]. Laser Journal, 2023, 44(10): 153-156.

(编辑 袁兴玲)

作者简介: 王健*, 男, 1989年生, 博士研究生。研究方向为噪声与振动控制。E-mail: wangjian890114@126.com。

本文引用格式:

王健, 张明, 刘松, 等. 基于频域前馈自适应算法的车内噪声主动控制仿真与试验分析[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 850-856.
WANG Jian, ZHANG Ming, LIU Song, et al. Simulation and Experimental Analysis for Active Vehicle Interior Noise Control Based on FFxLMS[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(4): 850-856.