

局部空间自适应宽带有源消声

陈克安 孙进才

任克明

(西北工业大学航海工程学院) (船舶工业总公司系统工程部)

1990年1月8日收到

本文提出一个局部空间自适应宽带有源消声系统,该系统能实现有源消声所要求的任意带宽噪声在局部空间衰减,能自动补偿背景噪声及消声装置中不可控参数及噪声源变化对消声效果的影响。自适应滤波由 TMS 32010 数字信号处理器采用 NLMS 算法多路并行处理完成。实验结果表明:对普通房间中的单级源布置方式,在主次级源前方 1m, $\pm 30^\circ$ 扇面区域内,该系统对 20—600Hz 内的宽带噪声抵消,取得的最大降噪量在 25dB(A) 以上。

一、引言

一个有源消声装置要取得 20 dB 以上的降噪量,则次级源对噪声源的幅度失真应在 10% 以下,相位失真在 5° 以下^[1]。这就要求消声系统只能有很小的附加相移和幅度失真,要做到这一点目前还存在很多困难。同时,在降噪区域,一些不可控参数(如温度,介质流速等)的变化将导致消声量降低。因此,有源消声采用自适应技术就显得非常重要。

自适应有源消声是这样一种技术:在消声区域通过不断监视降噪效果,追踪噪声场的变化,连续实时地调整次级源,使得消声效果最佳。从目前的研究来看,有源消声采用自适应技术至少有以下用途:①克服噪声源随机起伏变化对消声的影响。②在某些应用场合(如飞机舱室),要求在消除噪声的同时,尽量不影响语音信号的传播。③充分发挥信号处理器的运算功能,使消声装置中的电子线路最简单。

随着高速数字信号处理芯片的不断涌现及价格的下跌,自适应有源消声技术得到普遍应用。对于自适应噪声抵消,正如本文第二节指出的那样,随着噪声带宽的增加,消声量亦随之下降。本文指出一个系统以实现宽带噪声有源降噪,该系统的自适应滤波部分在 TMS32010

数字信号处理器上多路并行处理完成,采用 NLMS 算法。

二、自适应窄带噪声抵消

① 仿真模型

假设噪声源位于空间一点 P (如图 1), 由

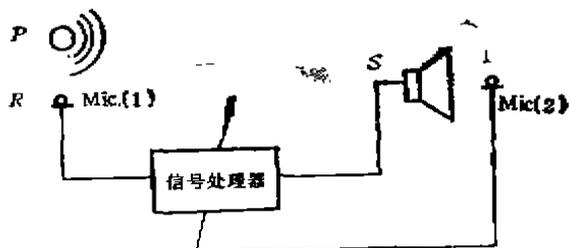


图 1 自适应有源消声示意图

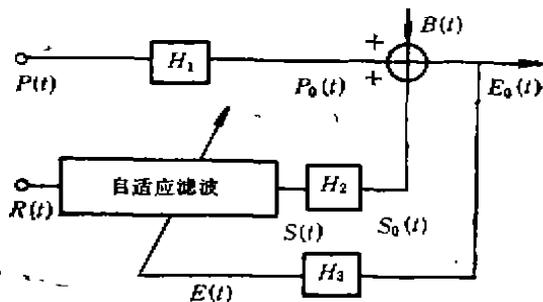


图 2 自适应有源消声仿真模型

传声器 (Mic. (1)) 接收, 其输出进入信号处理器, 经过自适应滤波后其输出作为次级源 (S 点) 的驱动信号, 在 E 点有一传声器 (Mic. (2)) 监视降噪效果, Mic. (2) 的输出反馈至信号处理器调整次级源幅度, 相位及频率, 保证最佳的降噪效果。降噪效果由降噪量 AL (Attenuation Level) 来表示, AL 定义如下:

$$AL = L_{PP} - L_{PS} = 20 \log_{10} \frac{P_P}{P_S} \quad (1)$$

式中 L_{PP} , P_P 及 L_{PS} , P_S 分别为消声系统启动前后监视点的声压级和声压有效值。

系统仿真模型见图 2。传声器 Mic. (1) 置于噪声场中, 其输出 $P(t)$ 作为自适应滤波器的参考输入 $R(t)$ 。 $P(t)$ 与 $R(t)$ 的关系由互相关系数 $\rho_{PR}(\tau)$ 来描述。

$$\rho_{PR}(\tau) = \frac{E\{[P(t) - \mu_P][R(t+\tau) - \mu_R]\}}{E\{[P(t) - \mu_P]^2\}E\{[R(t) - \mu_R]^2\}} \quad (2)$$

式中 μ_P, μ_R 分别为 $P(t), R(t)$ 的均值, $E[\cdot]$ 表示取数学期望。

空间传播及电声器件对声波及音频信号的影响分别由 $H_1(\omega)$, $H_2(\omega)$ 及 $H_3(\omega)$ 表示。假定 H_1, H_2 及 H_3 为线性系统, 它们只对噪声幅度及相位变化有影响, 而不引入波形失真。

图 2 中 $B(t)$ 表示背景噪声, 声压级为 L_{PB} 。假定它与 $P(t), R(t)$ 及 $S(t)$ 不相关(这一假定与实际测量分析结果是一致的^[2]), 仿真中由一高斯分布的白噪声序列来表示。

② 自适应滤波

要取得最大的降噪量, 则要求 L_{PS} 最小。在 E 点则要求:

$$E[E^2(t)] = \min. \quad (3)$$

$E(t)$ 见图 2, 自适应滤波器能自动调节它的权系数使满足式(3)所表示的最小均方误差 (Least Mean Square Error) 准则。本文采用横向结构的 FIR 滤波器形式实现自适应滤波, 假设滤波器长度为 N , 则权系数矢量及参考输入矢量由 \vec{W} 及 \vec{R} 表示。

$$\begin{aligned} \vec{W}_j &= [W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jN}]^T \\ \vec{R}_j &= [R_j, R_{j-1}, \dots, R_{j-N+1}]^T \end{aligned} \quad (4)$$

应用声学

式中下标分别表示时刻及序号, T 表示转置。

自适应滤波的核心在于选择一个计算量小稳定性好的算法。经过多次仿真比较^[2], 我们认为归一化递推功率估计最小均方 (Normalized Least Mean Square with Recursive Power Estimation, 以下简称 NLMS) 算法^[3] 能较好地满足有源消声的需要。它比目前常用的 LMS 算法计算量增加不多, 但它能在未知噪声功率的情况下自动选取收敛因子, 保证自适应过程的稳定, 防止过程发散引起次级源啸叫。

NLMS 有源消声的全过程如下: (式中已将模拟信号表示为离散采样的数字信号)

$$P_0(j) = P(j) * h_1$$

$$S(j) = \vec{W}_j \vec{R}_j^T = \sum_{k=1}^N W_{jk} R_{jk}$$

$$S_0(j) = S(j) * h_2$$

$$E(j) = [P_0(j) + S_0(j) + B(j)] * h_3$$

$$\pi(j+1) = \pi(j)(1-\beta) + N\beta R^2(j)$$

$$\vec{W}(j+1) = \vec{W}_j - \frac{\alpha E(j) \vec{R}(j)}{\gamma + \pi(j)} \quad (5)$$

式中 h_1, h_2 及 h_3 分别为 $H_1(\omega)$, $H_2(\omega)$ 和 $H_3(\omega)$ 的时域表达式, “*” 号代表卷积, $\pi(j)$ 是为计算 $\vec{W}(j+1)$ 而设的中间变量, β 用来控制收敛时间, γ 为很小的正常数, 防止当 $\pi(j)$ 趋于零时 $\vec{W}(j)$ 溢出, α 为收敛步距, 取值在 0—2 之间。

③ 仿真结果

(1) AL 的大小直接取决于 $P(t)$ 与 $R(t)$ 的相关程度, 即 ρ_{PR} 越大, AL 值越大。这就要求实际应用时 Mic. (1) 应尽量靠近噪声源, 取得较大的 ρ_{PR} 值。

(2) 滤波器长度 N 一般不应超过滤波器带宽的倒数, 对一定中心频率 f_0 的带宽噪声, 滤波器带宽与噪声带宽 Δ_P 成正比。对一定的 Δ_P 及 ρ_{PR} , N 有一最佳值 N_{opt} , 在 $N < N_{opt}$ 范围内, N 越大, AL 越大(如图 3 所示)。不过, N 越大, 运算时间及权系数失调量(权系数偏离其最佳值, 从而引起输出误差)也越大, 因此, 应同时考虑运算时间及权系数失调量, 折衷选取 N 值。

(3) 对一定中心频率的带宽噪声, Δ_P 越大, AL 愈低(如图 4 所示)。图 4 中, 当 $\Delta_P > 250\text{Hz}$ 时, AL 就很低了, 所以, 对于宽带噪声, 必须寻找另外的途径来抵消。

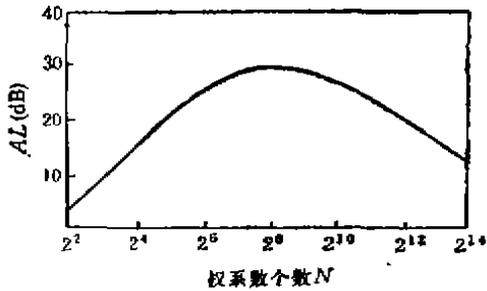


图 3 降噪量与权系数的关系
 $\rho_{PR}(0) = 0.95, f_0 = 500\text{Hz}, \Delta_P = 31.6\text{Hz}$
 $L_{PB} = 40\text{dB}, L_{PP} = 90\text{dB}$

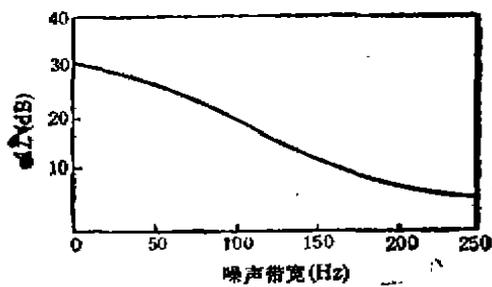


图 4 降噪量与噪声带宽的关系
 $\rho_{PR}(0) = 0.95, f_0 = 1\text{kHz}, N = 64$
 $L_{PB} = 40\text{dB}, L_{PP} = 90\text{dB}$

三、自适应宽带噪声抵消

如上所述, 当 f_0 一定, Δ_P 愈低, 则 AL 愈高。这就启发我们, 对于宽带噪声, 可将其转化

为窄带噪声。将一宽带噪声通过一组由低通, 带通组成的滤波器组, 将宽带噪声分为多路窄带噪声, 然后将每一路窄带噪声按上节所述方法分别予以抵消(将每一路窄带噪声抵消系统称为子系统), 最后将每个子系统输出相加作为次级源驱动信号, 如图 5 所示, 图中 LPF , BPF 分别为低通和带通滤波器 (Low Pass Filter, Band Pass Filter), 标有 NLMS 的方框表示采用 NLMS 算法的自适应滤波器。

将图 5 中的系统进行计算机仿真。其中 $P(t)$ 由频率范围为 $20\text{Hz} - 2\text{kHz}$ 的白噪声表示, 采用八个子系统, 各子系统 $\rho_{PR}(0) = 0.90 - 0.95, N = 8 - 64$, 最后最大的 AL 值在 50dB 以上(如图 6 所示, 图中横轴为频率 f , 纵轴为 AL)。

四、实验结果

① 实验系统构成

实验系统框图如图 7 所示。图中 SF 为移相器, 整个系统包括三个部分:

(1) 声学部分

本实验只作了单次级源布放下的局部空间宽带噪声抵消。由一只扬声器 (A) 模拟噪声源, 另一只扬声器 (B) 置于噪声源附近作为次级声源。误差传声器置于 A, B 两扬声器中轴线上, 其输出信号 $E(t)$ 通过一组滤波器后经过放大进入信号处理部分。

(2) 信号处理部分

该部分包括一块 TMS32010 开发板 (即

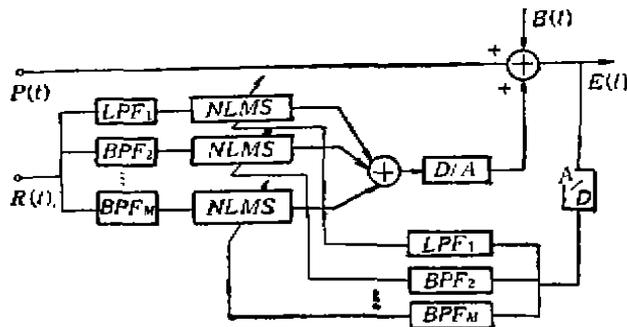


图 5 自适应宽带噪声抵消示意图

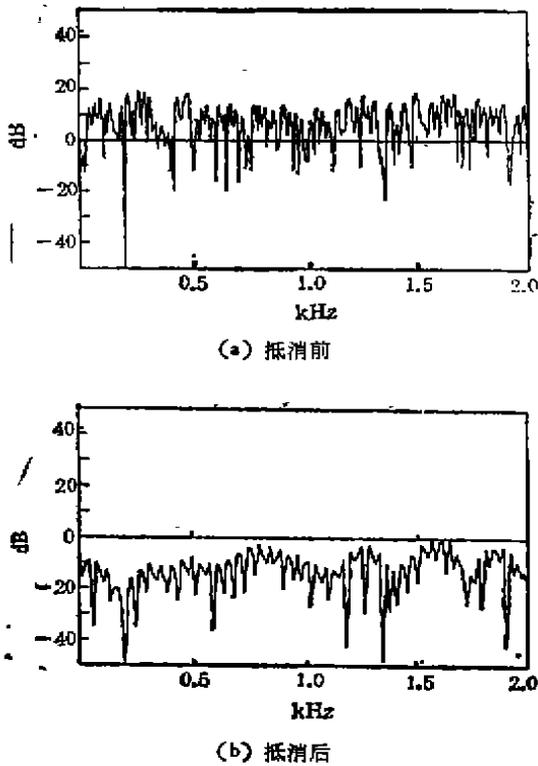


图6 自适应宽带噪声抵消仿真结果

由西北工业大学303教研室研制的303KF-32010数字信号处理系统), TP86A和一台IBM-PC计算机。

TMS32010数字信号处理器包含了每秒执行五百万条指令的NMOS单片计算机, 而它的90%的指令为执行时间仅一个指令周期200ns。由于有源消声一般在低频进行, 这样, 为完成宽带噪声抵消实现多路并行自适应滤波实时处理是完全可能的。

假设整个系统分为M个子系统, 则各子系统自适应滤波参数如 $\alpha_k, \beta_k, N_k (k=1, 2, \dots, M)$ 等分别以仿真结果为基础给出。各参数置于程序区(ROM)首端, 可随时修改。当整个系统完成后, 全部程序可固化在TP86A的EPROM上。

(3) 电子线路部分

它包括滤波器组, 电压放大器, 功率放大器及移相器等。由于软件实现多路自适应滤波而占用32010大量内存空间和运算时间, 因此, 本来可以由软件完成的滤波任务由模拟电路完

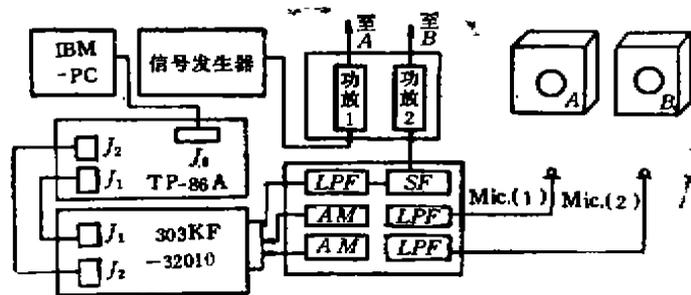


图7 自适应宽带噪声抵消实验系统构成

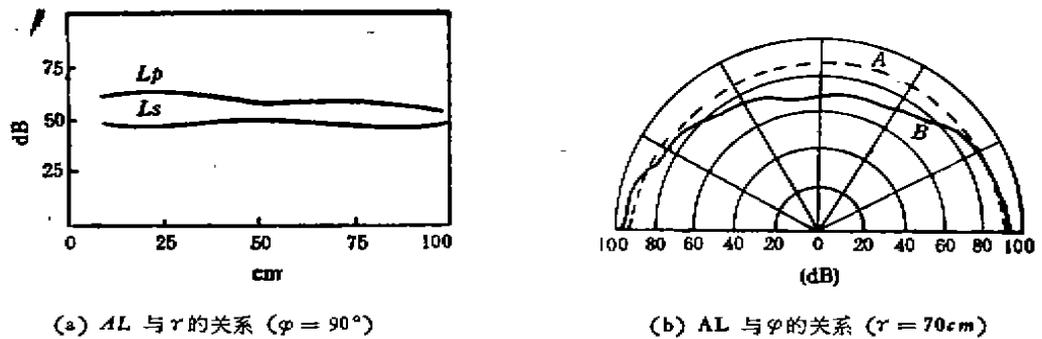


图8 自适应宽带噪声抵消实验结果

成。移相器是为了校正信号处理器 D/A 产生的附加相移。

另外，由于传声器输出信号与电路干扰噪声处于同一数量级，对电路干扰噪声的抑制应予以特别重视。

② 实验结果

实验中噪声源由两窄带噪声迭加而成，其中 $f_{01} = 500\text{Hz}$, $f_{02} = 800\text{Hz}$, $\Delta P_1 = 31.6\text{Hz}$, $\Delta P_2 = 100\text{Hz}$ 。实验采用二个子系统 $N_1 = 16$, $N_2 = 24$, A, B 两扬声器相距 70cm。实验结果如图 8 所示。A, B 扬声器连线中点作为原点 ($r = 0$)。图 8(a) 中横轴为距离 r , 图 8(b) 中采用极坐标。两个图中 L_r, L_s 分别为系统启动前后的噪声声压级 (A 声级)。

五、结 论

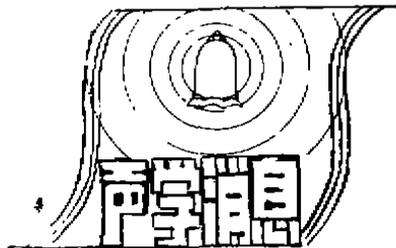
将宽带噪声通过一组由低通，带通滤波器组成的滤波器组，将其分为多路窄带噪声分别

予以抵消，由此构成了自适应宽带有源消声系统 (Adaptive Active Wide band Noise Cancellation System)。该系统采用 NLMS 算法，由 TMS32010 数字信号处理器多路并行处理完成。在普通房间单次级源布置方式下，对由两窄带噪声组成的宽带噪声，在主次级源前方 1m, $\pm 30^\circ$ 扇面区域内，最大降噪量可达 25 dB 以上。可以肯定，如果采用更好的次级声源阵和更高速度的信号处理芯片，降噪量和降噪区域将会更大。

本文的完成得益于马远良教授的指导，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] LaFontaine R. F., Shepherd I. C. J. *Sound and Vib* 110-3(1986), 495—509.
- [2] Chen Kean, Sun Jincai and Ma Yuangtang, WEST-PAC III, 1986, 665—668.
- [3] Treichler J. R. Jr., Johson C. R. Jr Larimore, M. G. "Theory and Design of Adaptive Filter". Prentice-Hall, Inc., Englewood, Cliff, 1986, 73—111.



由中国科学院声学研究所应崇福先生主编、七位专家联合撰写的《超声学》一书，已于 90 年底由科学出版社正式出版。全书近 50 万字，共分八章。其中大部分是按主要应用分章，包括检测超声、医学超声、声表面波、功率超声和高频超声等，着重介绍不同应用的声学基础。在本书的开篇通过弹性介质中的声波及超声的产生和接收两章，专门介绍了所有应用的共同基础。

《超声学》出版

长时间以来，国内外一直缺乏比较全面地介绍超声学的较新书籍。《超声学》的问世，在很大程度上填补了这方面的空白。该书包含了近 20 年来超声学发展的一些新内容，较全面地反映了超声学的当前面貌。内容深入浅出，概念清楚，论理严谨。可作为超声学专业研究生的教材，亦可供从事声学研究的大学院校教师及工程技术人员参考。

(尔仁)