基于时域逆滤波的宽带脉冲声生成技术

代阳[1], 杨建华[1], 侯宏[2], 陈建平[3]

(1.西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129; 2.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072
3.中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100094)

摘 要:为了改善扬声器的频率响应,生成稳定、可重复的宽带脉冲声信号,提出了基于时域逆滤波的宽带脉冲波生成技术。首先利用最长序列(MLS)测量扬声器的单位冲激响应,然后设计基于最小二乘(LS)准则和最小均方误差(MMSE)准则下的 FIR 逆滤波器,最后将信号分别经过 FIR 逆滤波器预处理,再次通过扬声器激励,生成了理想的巴特沃斯宽带脉冲信号。实验证明 2 种逆滤波算法行之有效,可以用于生成声学测试需要的宽带脉冲声,为实现声学性能现场测量提供了一种解决方案。

关 键 词:逆滤波;宽带脉冲法;正则化
中图分类号:TP216 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2758(2015)04-0688-06

随着制造业的蓬勃发展,各种声学设计已成为产品开发的重要组成部分,如轻薄结构、室内静音、水下隐身等。准确掌握产品的现场声学性能,从而为产品设计提供检验和回馈,是优化和完善产品设计的关键。产品材料的吸声/隔声性能的测量在与声学性能相关的室内设计、汽车飞机内饰设计以及水下航行器的声隐身设计等方面应用十分广泛。

脉冲回波法是一种常用的声学测量方法,常用于现场的吸声测量或者声管环境的声学测量,脉冲回波法的原理是发射一串宽频脉冲声波,分离经被测物体返回的入射声波和反射声波,计算被测物体的吸声系数[1-3]。脉冲回波法的关键是产生满足测试要求的宽频、可重复脉冲声波,脉冲声的质量直接影响测试的精度。一般要求脉冲波时间短、频带宽、波形规整,这样对于分离入射波形和反射波形有利,同时减少测试背景的干扰,提高信号信噪比。目前声学测量中使用的主要脉冲声信号主要有:短脉冲、MLS 序列、扩展脉冲等[1,4]。

脉冲回波法大都是在特定的实验室环境中进行,即使是自由场的声学测量也需要特定的测试环境和计算机设备,不能做到实时在线测量,其根本原因是宽带脉冲声的生成原理复杂,很难脱离计算机实现便携、实时、在线的现场应用,限制了该方法的使用。Patrick Gaydecki 利用计算机和 DSP56002,实现了实时逆滤波器设计,通过计算机程序计算逆滤波器系数,然后通过 R232 总线将滤波器系数传输 DSP56002,可用于音频增强和脉冲声生成,但是该方法属于半在线的实时计算[5]。本文按照脉冲回波法的测试要求,设计了 2 种基于时域的逆滤波算法,分别生成了宽带巴特沃斯宽带脉冲声信号。实验表明,2 种算法行之有效,可以用于声学测试的宽带脉冲声生成,为实现实时在线的脉冲声生成和现场的声学测量提供了一种解决方案。

1 时域逆滤波原理

逆滤波,也叫解卷积或者反卷积,是指“复现”系统的传递函数,达到还原信号或者消除噪声的目的。逆滤波在声学测量上的应用,主要用于修正扬声器系统的幅度和相位响应,从而获得一个平稳的信号输出。逆滤波的概念源自于线性滤波或者卷积操作,假设系统的输入输出满足如图 1 所示[6]:

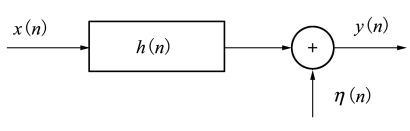


图 1 系统输入输出关系图

收稿日期:2014-10-28 **基金项目**:国家自然科学基金(11474230、11204242)资助
作者简介:代阳(1988—),西北工业大学博士生,主要从事声学测试研究。

$$y(n) = x(n) * h(n) + \eta(n) \quad (1)$$

$h(n)$ 为线性时不变系统的单位冲激相应,$x(n)$ 为系统输入,$y(n)$ 为系统输出,$*$ 代表卷积操作,$\eta(n)$ 为噪声干扰,逆滤波的目的就是要从输出 $y(n)$ 中估计 $x(n)$,一般方法是在 $x(n)$ 之前前置或者 $y(n)$ 之后级联一个系统,前置或级联的系统和原系统关系如下:

$$h_1(n) * h_2(n) = \delta(n) \quad (2)$$

$h_1(n)$ 为原系统,$h_2(n)$ 为前置或级联的系统。根据系统传递函数的特性,逆滤波分为有限冲击响应(FIR)逆滤波和无限冲击响应(IIR)逆滤波;根据逆滤波器系数的计算方法,逆滤波分为时域逆滤波和频域逆滤波[7]。李水等利用时域的 FIR 逆滤波进行了水下声学测试的应用,并取得了良好的效果[8],侯宏等通过对(2)进行傅里叶变换得到频域的表达式,得到滤波器系数的频域解,构造了频率逆滤波器并用于空气声和水声的脉冲声生成技术中[1-3]。FIR 滤波器具有稳定性好的特点,但是性能受到滤波器阶数的限制,而非因果的 IIR 滤波器,由于利用前面的无限数据和后面的无限数据来线性地估计滤波器的参数,因此非因果的 IIR 滤波器能给出反卷积器的性能上限[9]。本文讨论的主要就是因果的 FIR 逆滤波。

2　MLS 辨识系统单位冲激响应

根据逆滤波的工作原理,要构造逆滤波器,首先需要已知系统的单位冲激响应,李平友采用最长序列(MLS)对扬声器的单位冲激响应进行辨识[10]。本文采用 MLS 辨识方法对系统单位冲激响应进行辨识。最长序列(MLS)是一种伪随机序列,伪随机序列是人为产主、相位可控制和特性已知、具有白噪声统计特性的周期性序列。它的均值接近于零,自相关函数为周期性脉冲,自相关谱为一常数。MLS 序列测单位冲激响应的原理如下:

对于一个线性时不变系统,输出信号 $y(t)$ 可以表示成输入信号 $x(t)$ 和系统单位冲激响应 $h(t)$ 的卷积:

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int x(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau \quad (3)$$

系统输入信号和输出信号的互相关为:

$$r_{xy}(t) = \int x(\tau)y(\tau - t)\mathrm{d}\tau \quad (4)$$

将(3)式带入(4)式可得到:

$$\begin{aligned} r_{xy}(t) &= \int x(\tau)\int x(\tau)h(t-\tau)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}\tau \\ &= \int h(\tau)\int x(\tau)x(\tau - t)\mathrm{d}\tau\mathrm{d}\tau \\ &= \int h(\tau)r_{xx}(\tau - t)\mathrm{d}\tau = h(t) * r_{xx}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

对于 MLS 序列,其自相关为:

$$r_{xx}(n) = \delta(n) - \frac{1}{L+1} \quad (6)$$

L 为 MLS 序列长度,由 MLS 的阶数决定。将(6)式带入(5)式,有:

$$r_{xy}(n) = h(n) - \frac{1}{L+1}\sum_{k=0}^{L-1} h(k) \quad (7)$$

(7)式表明系统输入输出的互相关等于系统单位冲激响应 $h(n)$ 和 $h(n)$ 的直流分量(均值)之差,因此忽略直流分量偏差,可以认为:

$$r_{xy}(n) = h(n) \quad (8)$$

对于线性时不变系统来说,只需要计算出输入信号和输出信号的互相关序列,便可辨识出系统的单位冲激响应 $h(n)$。

3　2 种时域逆滤波方法

时域逆滤波器设计的原理就是根据(2)式的等式关系 ,以 $h_1(n)$ 为基构造卷积核矩阵,将卷积运算转换成矩阵乘法运算,然后解矩阵方程便得到 FIR 逆滤波器系数。根据矩阵构造方法的不同,可以分为基于最小二乘准则的 LS 逆滤波和基于最小均方误差准则的 MMSE 逆滤波。

3.1　时域最小二乘(LS)逆滤波

假设 $h_2(n)$ 长度为 M(滤波器长度),$h_1(n)$ 长度为 N,则 $\delta(n)$ 长度为 $M+N-1$,则有[5]:

$$\begin{bmatrix} h_1(0) & 0\cdots & \\ h_1(1) & h_1(0) & 0 \\ \vdots & & \\ h_1(M-1) & \cdots & h_1(0) \\ \vdots & & \\ h_1(N-1) & \cdots & h_1(N-M) \\ \vdots & & \\ 0 & & h_1(N-1) \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} h_2(0) \\ h_2(1) \\ \vdots \\ \vdots \\ h_2(M-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

令(9) 式最左侧的卷积核矩阵为 $\boldsymbol{C}$,上述方程的最小二乘解为:

$$h_2 = (\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C})^{-1}C^{\mathrm{T}}a_m \tag{10}$$

$$a_m = \delta(n-m) = \begin{cases} 1 & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases} \tag{11}$$

卷积核矩阵 $\boldsymbol{C}$ 为 Toeplitz 矩阵,并且 $\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}$ 为对称矩阵,利用这些性质可以采用 Levinson 递归算法[6],加快计算速度。

3.2 时域最小均方误差(MMSE)逆滤波

维纳以随机信号为研究对象,建立了噪声模型,以统计的方法,以最小均方误差准则导出了 FIR 维纳滤波反卷积和 IIR 维纳滤波反卷积,因此 MMSE 逆滤波也称为维纳逆滤波[9]。MMSE 逆滤波从如下模型出发:

$$\xi = \mathrm{E}\{|\ e(n)\ |^2\} = \mathrm{E}\{|\ \delta(n) - h_1(n) * h_2(n)\ |^2\}$$

$$= \mathrm{E}\{|\ \delta(n) - \sum_{m=0}^{M} h_1(m)h_2(n-m)\ |^2\} = \min \tag{12}$$

由正交性原理得:

$$\mathrm{E}\{|\ \delta(n) - \sum_{m=0}^{M} h_1(m)h_2(n-m)\ |\ h_2^*(n-k)\} = 0$$

$$k = 0,1,\cdots,M \tag{13}$$

展开后即为 :

$$\sum_{m=0}^{M} r_{h_1}(k-m)h_2(m) = r_{a_m h_2}(k)$$

$$k = 0,1,\cdots,M \tag{14}$$

上式的矩阵形式为 (15) 式所示:

$$\begin{bmatrix} r_{h_1h_1}(0) & r_{h_1h_1}(1) & \cdots & r_{h_1h_1}(M-1) \\ r_{h_1h_1}(1) & r_{h_1h_1}(0) & \cdots & r_{h_1h_1}(M-2) \\ r_{h_1h_1}(2) & r_{h_1h_1}(1) & \cdots & r_{h_1h_1}(M-3) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{h_1h_1}(M-1) & r_{h_1h_1}(M-2) & \cdots & r_{h_1h_1}(0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} h_2(0) \\ h_2(1) \\ h_2(2) \\ \vdots \\ \vdots \\ h_2(M-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{a_m h_1}(0) \\ r_{a_m h_1}(1) \\ r_{a_m h_1}(2) \\ \vdots \\ \vdots \\ r_{a_m h_1}(M-1) \end{bmatrix} \tag{15}$$

M 为 FIR 滤波器长度,(15)式等号左侧自相关矩阵为对称的 Toeplitz 矩阵,可以使用 Levinson 递归算法[6],加快计算速度。

4 实验验证

4.1 实验装置

实验装置主要由计算机、数据采集卡 NI6062E、功率放大器 B&K2716、惠威扬声器 M3N、声望传声器 MPA416、声望信号调理 MC1016,由计算机生成数字信号经过 D/A 输出经过功放驱动扬声器发声,声音经传声器采集变成电压信号,经过信号调理的滤波、放大后经 DAQ 的 A/D 采样输入到计算机,计算机对采集到的数字信号进行分析、处理。实验原理图如图 2 所示,实验系统中,传声器与扬声器中心的间距为 10 cm。

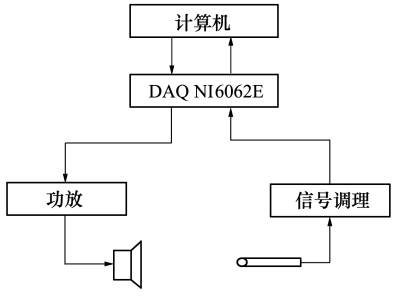


图 2 实验系统原理图

4.2 实验步骤和结果

1)生成长度为 4 096 点(14 阶)的 MLS 序列,经 D/A 输出和功放放大后激励扬声器,计算机采集信号进行存储,数据采集卡的 A/D 采样率为 50k Sa/S,通过(8)式计算系统的单位冲激响应 。MLS 序列的响应信号和计算的单位冲激响应如图 3 和图 4 所示:

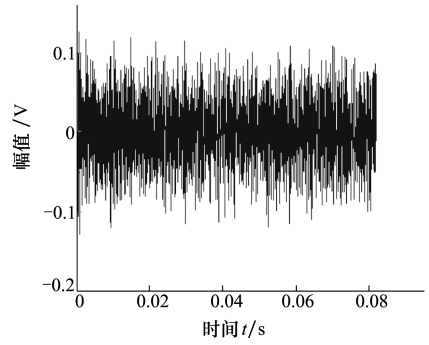


图 3　MLS 序列响应波形

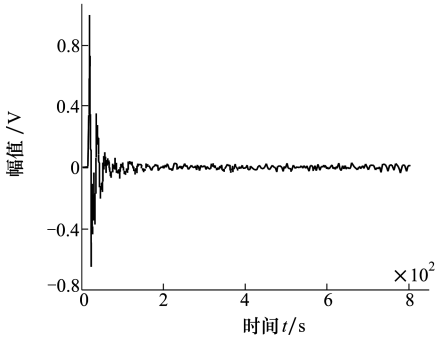


图 4　MLS 辨识的单位冲激相应

2)根据步骤 1 计算的单位冲激响应,分别设计基于 LS 准则和 MMSE 准则的逆滤波器,FIR 逆滤波器的长度为 4 096,将目标信号经过前置逆滤波器"增强"后得到驱动信号并保存,目标信号为截至频率为 5k 的巴特沃斯宽带脉冲信号,两种逆滤波产生的驱动电压信号如图 5 和图 6 所示:

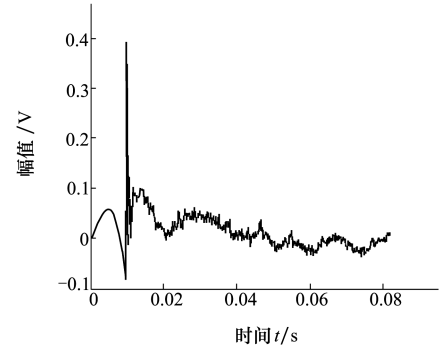


图 5　LS 逆滤波的驱动电压波形

3)加载步骤 2)计算的驱动电压信号,分别再次对系统进行激励并采集信号,得到理想的宽带脉冲信号,经逆滤波后的声压波形如图 7 和图 8 所示:

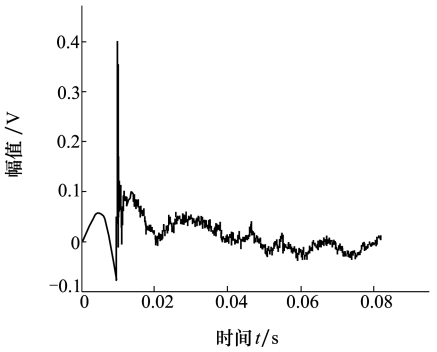


图 6　MMSE 逆滤波的驱动电压波形

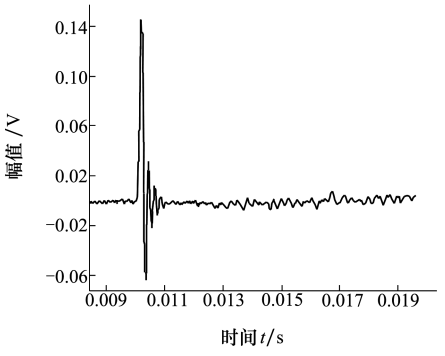


图 7　LS 逆滤波得到的脉冲声波形

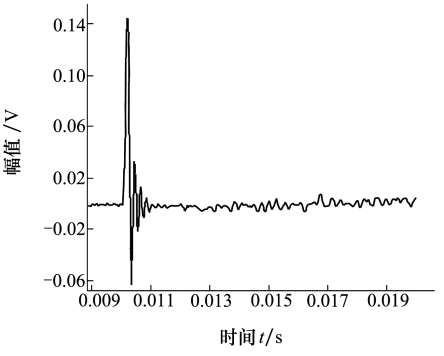


图 8　MMSE 逆滤波得到的脉冲声波形

为了更细致地分析声压波形,分别截取图 7 和图 8 中波形的 0.009 8 s~0.011 44 s 的有效波形,如图 9 和图 10 所示:

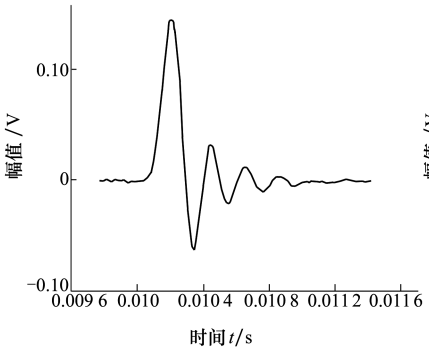


图 9 LS 逆滤波截取的脉冲声波形时域

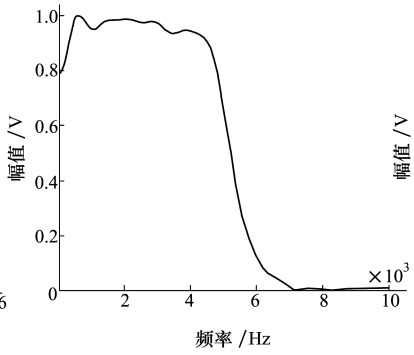


图 10 LS 逆滤波截取的脉冲声波形频域

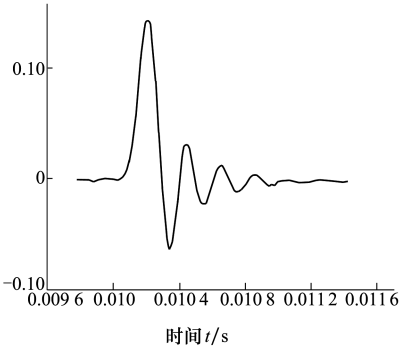


图 11 MMSE 逆滤波截取的脉冲声波形时域

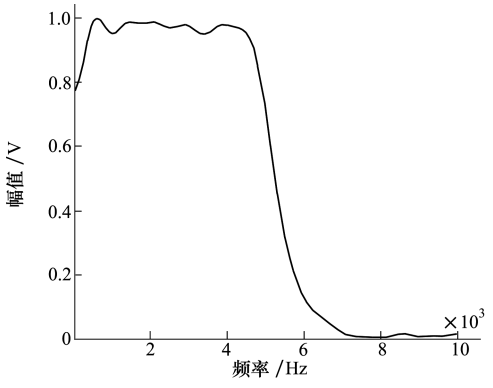


图 12 MMSE 逆滤波截取的脉冲声波形频域

短时、宽频带脉冲声非常适合声学测量,宽频带特性方便一次测量覆盖全频带的参数,而短脉冲对于波形的分离、截取非常有帮助。由图 9 和图 11 可以发现,最终截取的有效波形长度在 1.6 ms 左右,3 dB 带宽的频率范围为 100~5 000 Hz,完全符合宽带脉冲法测试对于声源的要求,并且提高数据采集设备的采样率可以进一步压缩脉冲声波长度,增加 FIR 逆滤波器的长度可以进一步提高信噪比,但是带来的结果是增加了计算时间,在保证测试的精度的前提下,逆滤波器系数越短越好。对比上述实验数据还可以发现,LS 逆滤波和 MMSE 逆滤波的 FIR 逆滤波器系数很接近,从而导致了 LS 逆滤波和 MMSE 逆滤波的各个步骤产生的波形结果非常一致,说明了时域 2 种逆滤波方法是等效的,2 种逆滤波方法都得到了最终的目标波形,因此,2 种逆滤波方法都可以用于宽带脉冲声生成和现场的声学测量。

5 结 论

目前,脉冲法的实验室测试方法已经相对成熟,但是实时在线的脉冲法测试难以实现,主要原因是实时在线的宽带脉冲声生成难以实现,宽带脉冲声主要通过逆滤波的方法获取,逆滤波一般分为时域逆滤波和频域逆滤波,对于同样长度的滤波器系数,时域滤波器比频域滤波器的鲁棒性更强,有利于生成平坦的宽带脉冲波。频域逆滤波通过傅里叶变换将解卷积运算映射到频域计算然后将滤波器系数通过反傅里叶变换变换到时域,由于整个运算需要多次傅里叶和复数乘除运算,虽然现在浮点 DSP 已经能够处理这些运算,但是对于普通的嵌入式处理器却十分困难。本文设计的时域逆滤波的原理就是根据系统的单位冲激响应设计一个 FIR 逆滤波器,滤波器的长度可以人为设定,由于在整个过程中的运算都是实数域内的运算,并且不管是 LS 逆滤波还是 MMSE 逆滤波,只需要知道卷积核矩阵的第 1 列数据,就可以使用 Levinson 快速算法计算滤波器系数,因此非常适合向嵌入式系统移植,并且方程构造的矩阵形式对于多输入/多输出的多通道逆滤波器设计非常有利。本文基于时域逆滤波宽带脉冲声生成方法行之有效,为实现实时在线的脉冲声生成和现场的声学测量提供了一种解决方案,该方法同样适合于水声测试。

参考文献:

[1] 侯宏,孙亮,董利英. 声管脉冲回波法吸声系数测量技术[J]. 计量学报, 2010,31(2):101-105
Hou Hong, Sun Liang, Dong Liying. Sound Absorption Measurement in a Circular Pipe with the Echo-Pulse Method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2010,31(2): 101-105 (in Chinese)

[2] Sun Liang, Hou Hong. Measurement of Sound Absorption by Underwater Acoustic Material Using Pulse-Separation Method[J]. Applied Acoustics, 2014, 85: 106-110

[3] Sun Liang, Hou Hong. An Improved Water-Filled Pulse Tube Method Using Time Domain Pulse Separation Method[J]. J Marine Sci Appl, 2013, 12: 122-125

[4] Jing X, Fung K Y. Generation of Desired Sound Impulses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297: 616-626

[5] Patrick Gaydecki. A Versatile Real-Time Deconvolution DSP System Implemented Using a Time Domain Inverse Filter[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12: 82-88

[6] 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
Zou Mouyan. Deconvolution and Signal Recovery[M]. BeiJing: National Defence Industry Press, 2001 (in Chinese)

[7] Norcross S G, Soulodre G A, Lavoie M C. Subjective Investigations of Inverse Filtering[J]. J Audio Eng Soc, 2004, 52: 1003-1028

[8] 李水, 缪荣兴. 水声材料性能的自由场宽带压缩脉冲叠加法测量[J]. 声学学报, 2000, 25(3): 248-253
Li Shui, Miao Rongxing. Measurements for the Properties of Underwater Acoustic Materials by Broadband Compressed Pulse Superposition Method[J]. Acta Acustica, 2000, 25(3): 248-253 (in Chinese)

[9] 杨绿溪. 现代数字信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2007
Yang Lüxi. Advanced Digital Signal Processing[M]. BeiJing: Science Press, 2007 (in Chinese)

[10] 李平友. 用最长序列测量扬声器的脉冲响应[J]. 应用声学, 1997,12(1):11-16
Li Pingyou. Measurements of Loudspeaker's Response with MLS[J]. Applied Acoustics, 1997,12(1):11-16 (in Chinese)

Pulse Sound Generation Based on Time-Domain Inverse Filter

Dai Yang[1], Yang Jianhua[1], Hou Hong[2], Chen Jianping[3]

(1.Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710029, China
2.School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
3.China Ship Systems Engineering Research Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to improve the frequency response of loudspeaker and generate a stable and repeatable broadband pulse sound, a new technique of pulse sound generation based on time-domain inverse filter is proposed. Firstly, Maximum Length Sequence (MLS) is utilized to measure the impulse response of the loudspeaker. Then, an inverse filter is designed with Least Squares (LS) rule and Minimum Mean Square Error (MMSE) rule respectively. Finally, by exciting the loudspeaker with pre-filtered voltage signal, the desired Butterworth pulse sound can be produced successfully. Experimental results and their analysis show preliminarily that both inverse filter methods are effective, which can be applied in pulse sound generation and provide a solution to real-time online acoustic measurement in the field.

Key words: acoustic generators, autocorrelation, convolution, deconvolution, design of experiments, efficiency, experiments, filters, FIR filters, Fourier transforms, frequency domain analysis, frequency response, least squares approximations, loudspeakers, matrix algebra, mean square error, time domain analysis, transfer functions; inverse filter, regularization, wide band pulse method