

枪声信号分析与预处理

蒋小为¹, 朱晓龙¹, 张文^{1,2}

(1. 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073;

2. 国防科学技术大学海洋科学与工程研究院, 长沙 410073)

摘要: 本文分析了枪声信号时频域特点并对枪声信号进行了有效的预处理。首先分析了枪声信号时域波形特征, 并由傅里叶变换得到了相应的频谱信息; 然后根据枪声信号以及噪声信号在时域和频域上的特征, 利用巴特沃斯低通滤波器去除频率高于 1200Hz 的噪声干扰; 并利用谱减法降噪, 消除工频信号及其谐波的影响。实验结果表明: 枪声信号在时域和频域上均具有明显的强脉冲信号的特点; 低通滤波和谱减法能有效的抑制噪声干扰, 且不会带来明显的枪声信号失真。最后, 依据预处理后的信号特征, 提出了一种基于频谱和相关分析相结合的枪声信号检测的设想。

关键词: 枪声信号; 时域分析; 频域分析; 低通滤波; 谱减法降噪; 相关分析

Analysis and processing of the gunshot signal

JIANG Xiao-wei¹, ZHU Xiao-long¹, ZHANG Wen^{1,2}

(1. College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China;

2. Academy of Ocean Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: In this paper, the gunshot signal was analyzed in time domain and frequency domain, and it was preprocessed in efficient methods. First, waveform characteristic in time domain and spectrum information of the gunshot signal was obtained by Fourier Transform. Then, the noise above 1200Hz was restrained by Butterworth low-pass filter, according to the features of gunshot signal and noise signal. Moreover, spectral subtraction was applied to eliminate the interference of industrial frequency signal and its harmonic signals. The analysis results are as follows. The gunshot signal has very obvious characteristic of strong pulse signal. Low-pass filtering and spectral subtraction can restrain the noise effectively without distorting the gunshot signal. Finally, considering the characteristic of the preprocessed signal, a kind of gunshot detection method based on the combination of frequency and correlation analysis was proposed.

Key words: gunshot signal; time-domain analysis; frequency-domain analysis; low-pass filter; spectral subtraction; correlation analysis

0 引言

步枪射击时的击发过程为: 火药爆炸, 高温高速高压气流将弹头推出枪口, 形成膛口激波。膛口激波携带的信息常用来进行枪声检测和定位。如张飞猛^[1]等人就提出利用膛口激波进行枪声定位研究, 并取得了较好的实验结果。本文的试验就利用了 95 式自动步枪射击时发出的膛口激波。

膛口激波信号强度弱, 频率低, 而且在冲击波信号之后出现, 所以冲击波的反射波和较大的噪声就可以将膛口激波淹没。因此, 膛口激波在检测之前要进行必要的处理, 目的是抑制或削弱不需要的

噪声和干扰, 同时提高膛口激波信号的信噪比, 以便于信号的检测。但是现有的枪声信号处理往往弱化了噪声的干扰, 如 Clavel^[2]等人利用线性预测倒谱系数 LPCC 表征声音信号, 并通过高斯混合模型 GMM 检测识别噪声环境下发生的枪声时, 就仅限于高斯白噪声, 而没有考虑其它噪声。

为了提高枪声信号的可信度, 赵新^[3]用凯泽窗设计法设计有限长单位冲激响应 FIR 低通滤波器, 滤去高频噪声干扰, 但采集枪声信号的过程中不可避免地会混入 50Hz 的工频信号及其谐波信号, 而枪声信号主要集中在低频频段, 因此仅仅靠低通滤波是不彻底的。蒋婷^[4]采用加权最小二乘法来提高噪声条件下的定位精度, 但最小二乘法主要用于去除直流分量和趋势项^[5], 而实验表明枪声信号直流分量和趋势项很小, 对枪声信号影响不大。

综上, 有必要深入研究枪声信号的时域和频域特性并据此提出有效的降噪处理方法。本文在已有理论和实验研究成果的基础上, 实地采集了 95 式

收稿日期: 2015-07-05; 修回日期: 2015-09-30

基金项目: 大学生创新训练项目

作者简介: 蒋小为(1995-), 男, 湖南邵阳人, 本科生, 研究方向为声音信号处理。

通讯作者: 张文, E-mail: zhangwen06@nudt.edu.cn

自动步枪的声信号, 并进行了时域和频域分析, 通过低通滤波和谱减法相结合的降噪流程, 有效的对枪声信号进行了预处理。之后, 依据处理后信号的时域和频域特征, 提出了一种基于频谱和相关分析相结合的枪声信号检测的设想。

1 枪声信号的时域频域分析

枪声信号的时域分析主要有短时能量、短时幅度、短时自相关函数、短时过零率等, 而频域分析中主要用傅里叶变换等。此外, 枪声信号还有倒谱分析、语音特征参数 MFCC、小波变换、经验模式分解 EMD 等其他变换域中的分析手段。本文主要使用分帧处理后的傅里叶变换, 也即短时傅里叶变换分析枪声信号和噪声信号的频谱特征。由于枪声信号作为强脉冲信号的一种, 信噪比较高, 因此短时能量、短时平均幅度以及短时自相关函数等时域处理的结果在预处理前后的变化不大, 预处理的效果主要以处理前后波形变化为参考。

2 枪声信号的预处理

要对枪声信号进行具体分析, 首要问题是提取出枪声信号的特征。枪声特征作为枪声区别于背景噪声的主要依据, 对枪声信号的检测、计数、定位等具体分析有着极其重要的意义。而枪声信号特征提取的关键是对信号的预处理。本文主要采用低通滤波器和谱减法降噪进行信号的预处理。枪声的特征参数在滤波前后的变化情况可以作为背景噪声抑制, 枪声信号改善以及信噪比提高的评判标准。

2.1 低通滤波降噪

频域分析结果表明: 枪声信号较为均匀地分布在较宽的频段上, 在低频段有几处峰值; 噪声明显集中在低频段。考虑到枪声信号幅值大, 滤去高频段的部分不会导致枪声信号波形明显失真, 本文先采用低通滤波器滤去高频段噪声干扰。

本文选择的是巴特沃斯滤波器, 若 T 为采样间隔, 其振幅平方函数为

$$A(\Omega^2) = |H_a(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{j\Omega}{j\Omega_c}\right)^{2N}} = \frac{1}{1 + (\Omega/\Omega_c)^{2N}} \quad (4)$$

其中模拟角频率 Ω 与 ω 的关系为:

$$\omega = \Omega T \quad (5)$$

实验中所用到的巴特沃斯低通滤波器的幅频

特性如图 1 所示:

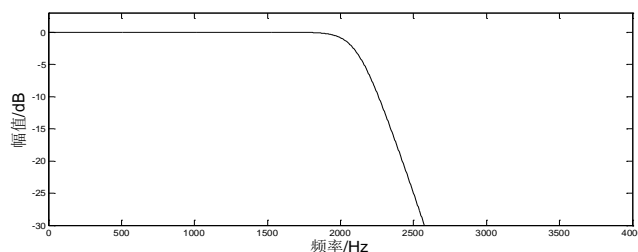


图 1 低通滤波器幅频特性

Fig. 1 The amplitude-frequency characteristic of low-pass filter

2.2 谱减法降噪

设枪声信号的序列为 $x(n)$, 加窗分帧处理后得到第 i 帧语音信号为 $x_i(m)$, 帧长为 N 。任何一帧语音信号 $x_i(m)$ 做快速傅里叶变换 (FFT) 后为

$$X_i(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x_i(m) \exp(j \frac{2\pi mk}{N}) \quad k = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

要对 $X_i(k)$ 求出每个分量的幅值和相角, 幅值是 $|X_i(k)|$, 它的相角是

$$X_{angle}^i(k) = \arctan \left[\frac{\text{Im}(X_i(k))}{\text{Re}(X_i(k))} \right] \quad (7)$$

已知噪声段时长为 I , 对应的帧数为 NIS , 可以求出该噪声段的平均能量值为

$$D(k) = \frac{1}{NIS} \sum_{i=1}^{NIS} |X_i(k)|^2 \quad (8)$$

谱减法算法为

$$|\hat{X}_i(k)|^2 = \begin{cases} |X_i(k)|^2 - aD(k) & |X_i(k)|^2 \geq aD(k) \\ bD(k) & |X_i(k)|^2 < aD(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中, a 和 b 是两个常数, a 称为过减因子, b 称为增益补偿因子^[5]。

利用 $X_{angle}^i(k)$ 和 $|\hat{X}_i(k)|$ 经快速傅里叶变换逆变换 (IFFT) 即可求出谱减法降噪后的序列 $\hat{x}_i(m)$ 。

谱减法的原理图如图 2 所示^[5]。

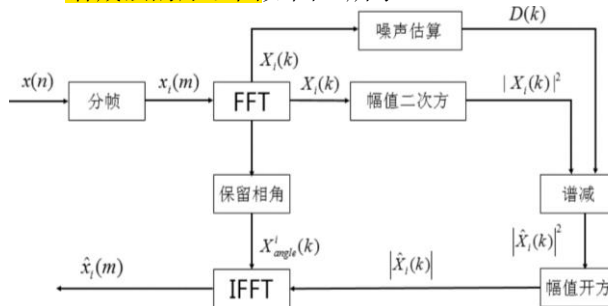


图 2 谱减法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spectral subtraction

3 枪声测试实验和结果分析

3.1 枪声测试实验概况

3.1.1 实验现场

实验现场平面图如图3所示, P_{10} 、 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{13} 为四把等间距排列的 95 式自动步枪, 间距 3m; A、B、C、D 四个传声器呈正方形排列, 边长 3m, 传声器 A、B 与 C、D 和地面垂直距离分别为 0.8m 和 1.5m; 传声器阵列与自动步枪的垂直距离为 6m。

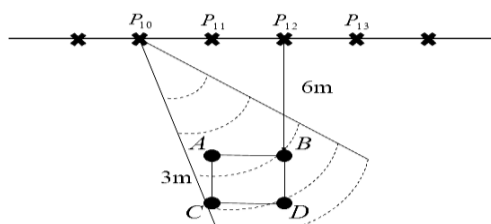


图3 实验现场平面图

Fig.3 The plane figure of the experiment

3.1.2 实验设备

20 把无明显差异的 95 式自动步枪, 4 个型号为 4192 的 B&K 传声器, 1 个型号为 4321 的 B&K 传声器校准器, 1 台四通道 B&K 传声器偏置电路, 以及一台安装有 B&K Pulse 软件的笔记本电脑。

3.1.3 实验流程

实验时由指挥员下达射击口令, 听到口令后, 射击人员自行完成 10 次射击。声音信号采集在射击前 1 分钟开始, 全部人员射击完成后继续采集 1 分钟。信号由传声器阵列采集后进行处理并保存。

3.2 实验结果分析

实验采集的一组典型的枪声信号时域波形如图4所示, 枪声信号在时域上具有强脉冲信号的特点, 具有很高的辨识度, 幅值上升趋势很陡。

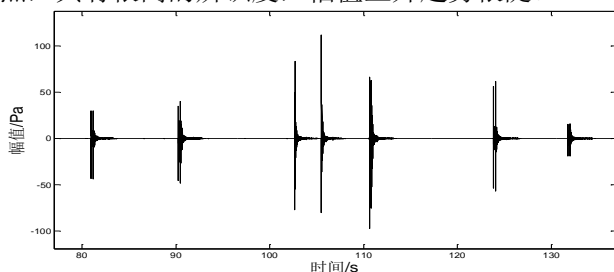


图4 枪声信号波形图

Fig.4 Gunshot signal wave

单独提取上述信号中的一段较强枪声信号及一段没有枪声的噪声信号, 分析其时域和频域特点, 发现枪声信号在时域上的幅值变化特点是: 先有一个较强的负声压, 然后枪声幅值较快的上升至

较高值, 如图5所示。在频域上, 枪声信号在低于 500Hz 的频率区间中有一个明显的峰值, 如图6所示。噪声信号波形图和频谱图分别如图7、图8所示, 在时域上幅值小, 周期性明显; 在频率为 20Hz ~50Hz、90Hz~110Hz、240Hz~290Hz 的区间上幅值明显高于其他频段。可见, 噪声信号集中分布在低频段, 且有较明显的谐波特性。

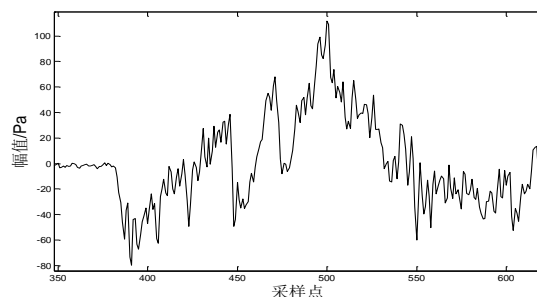


图5 较强枪声信号的时域波形图

Fig.5 The oscillogram of gunshot in time domain

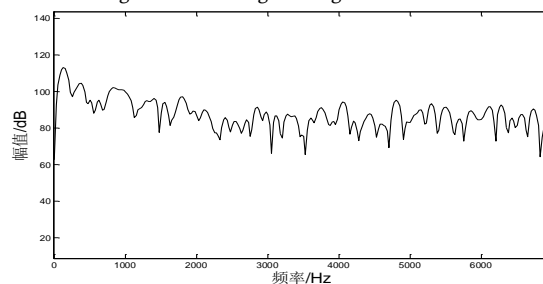


图6 较强枪声信号的频谱图

Fig.6 The frequency domain of gunshot signal

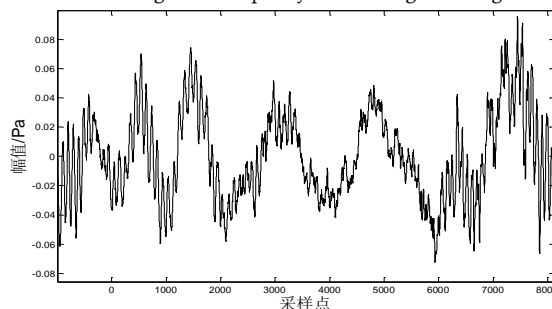


图7 噪声信号的时域波形图

Fig.7 The oscillogram of noise in time domain

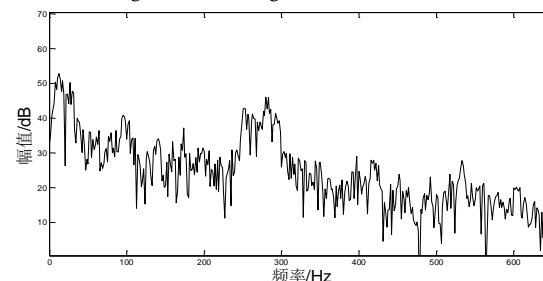


图8 噪声信号的频谱图

Fig.8 The frequency domain of noise

噪声与枪声信号在 50~300Hz 频段附近都集中有较强烈的能量。先进行低通滤波, 滤去频率高于 1200Hz 的高频噪声的干扰。又由前面的分析, 该频

段噪声体现出较明显的谐波性（主要为工频信号干扰）。因此通过谱减法来去除工频信号及其谐波的干扰。处理后的枪声信号以及噪声信号时域波形分别如图 9、图 10 所示。枪声信号波形得到极大改善。

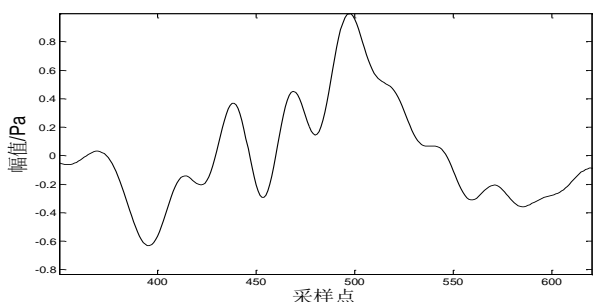


图 9 预处理后的枪声信号时域波形图

Fig.9 The time domain of gunshot signal after preprocessing

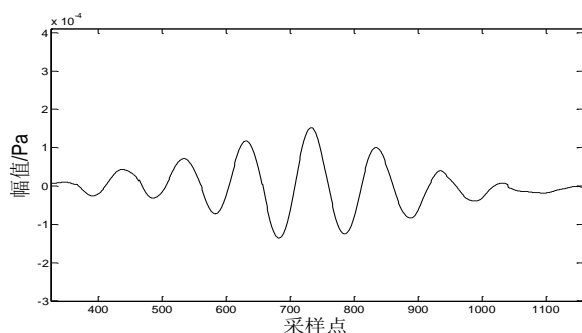


图 10 预处理后的噪声信号时域波形图

Fig.10 The time domain of noise after preprocessing

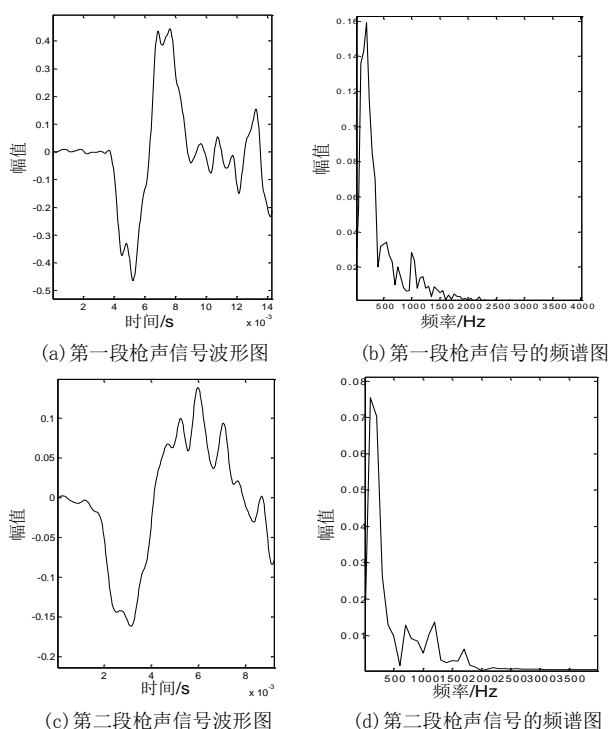


图 11 预处理后的两段枪声信号时频域图

Fig.11 The time and frequency domain of two gunshot signals after preprocessing

3.3 信号预处理结果的进一步分析

通过上述预处理，枪声信号时域波形和枪声频谱相对于噪声有了明显的辨识度，可以较为容易的提取信号特征。同时，在图 11 中，尽管两段枪声信号能量有差别，波形有差异，但频谱波形具有较强的相似性。因此，可以考虑对枪声信号进行频谱的互相关分析，从而实现枪声信号的检测。

4 结 论

本文实地采集了 95 式自动步枪声信号，根据时域和频域特征进行低通滤波以及谱减法预处理后，分析了枪声信号特征，得出如下结论：

(1) 枪声信号具有强脉冲信号的特点，其幅值先有一个较强的负值然后快速变化到峰值；频域上能量在各频段分布较为均匀，但在低于 500Hz 的频率区间内有一个明显的峰值。

(2) 在实际的测试条件下，影响枪声信号的主要噪声来源于工频信号及其谐波，直流分量和趋势项对枪声信号波形影响不大。

(3) 谱减法和低通滤波分别能有效的抑制工频信号和高频噪声的干扰，且处理后的枪声信号几乎无波形失真，噪声信号被抑制至极低的水平。

(4) 预处理之后，枪声信号在能量上和频谱的波形上，与噪声有很大差异，可以考虑使用相关法分析来进行枪声的检测。

参 考 文 献

- [1] 张飞猛, 马春茂. 对空射击声学靶脱靶量测试系统的精度分析[J]. 兵工学报, 2000, 21(1): 23—26
ZHANG Feimeng, MA Chunmao. Accuracy analyses for the measuring system of target deviation for projectiles shooting and acoustic target[J]. Acta Armamentarii, 2000, 21(1):23-26.
- [2] Clavel C, Ehrette T, Richard G. Events detection for an audio-based surveillance system[C] IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2005.
- [3] 赵新. 被动次声定位系统滤波器设计及 Matlab 仿真实现[J]. 中国科技博览, 2009, 31.
ZHAO Xin. Filter design of passive acoustic positioning system and the realization by Matlab[J]. ZHONGGUO KEJI BOLAN. 2009, 31.
- [4] 蒋婷, 刘建平, 张一闻. 基于多麦克风阵列的枪声定位算法研究[J]. 计算机应用和软件, 2012.
JIANG Ting, LIU Jianping, ZHANG Yiwen. Research on unfired location algorithm based on multiple microphone arrays[J]. Computer Applications and Software, 2012
- [5] 宋知用. MATLAB 在语音信号分析与合成中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013. 101-104.
SONG Zhiyong. The application of MATLAB in analyses and synthetize of speech signal[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2013. 101-104