

基于小波包理论的激波信号去噪研究

孙萍萍

(西安工业大学光电工程学院 西安 710021)

摘要:超音速弹丸产生的激波信号在采集的过程中受到各种噪声的严重影响,导致了弹道参数测量精度的下降,因而必须对采集到的信号进行去噪处理。首先介绍了激波信号的特点以及成分,就信号降噪方法的选取展开了分析。但是由于激波信号是一个暂态信号,故而采用具有时频分析能力的小波包作为去噪的主要工具。使用小波理论进行去噪的好坏与阈值的选取息息相关,重点就小波包函数、分解尺度以及阈值的选取过程进行了研究。实验结果表明使用小波包对激波信号进行多阈值降噪处理具有良好的效果和优势。

关键词:激波信号;多阈值去噪;小波包

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Denoising of shock signal based on wavelet packet theory

Sun Pingping

(College of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technologic University, Xi'an 710021, China)

Abstract: Measuring accuracy of trajectory parameters decreases because of the serious effect caused by noises produced in the process of shock signal acquisition of supersonic bullets. It is necessary to denoise signals acquired. This paper firstly introduces characteristics and elements of the shock and then analyses process about how to choose ways to denoising. Wavelet packet with the quality of time-frequency analysis is chose as the main tool for denoising in this paper. The effect of denoising is closely linked to the choice of threshold in theories of wavelet. The setting process of wavelet function, decomposition scale and threshold is mainly talked in this paper. The results shows that multi-threshold denoising to shock wave by use of wavelet packet is extremely workable and proponent.

Keywords: shock wave; multi-threshold denoising; wavelet denoising

1 引言

声传感器采集到的信号是一个多变量作用下的信号^[1]。噪声的存在严重影响了激波信号的识别,进而影响了弹道参数测量的精度。故而对传感器采集到的信号进行降噪处理具有十分重要的意义。使用基于傅里叶变换原理滤波器是一种经典的信号处理方法。但这种方法对信号处理缺乏灵活性,只能实现对部分频带的有效去噪,其以上的特点严重限制了这种降噪方法在暂态信号处理方面的应用。为了实现对信号的多分辨率分析,小波理论应运而生,小波变换通过不同尺度的分解将信号分解到不同的频带上,这极大方便了对各个频段噪声的处理。小波理论对激波信号进行处理可以极大的提升去噪效果。

本文选用小波包对激波信号进行处理,其与小波变换

相比,在同样的分辨率下能够对信号的频带进行更为细致的划分,进而方便对信号各个频谱范围内噪声分布的了解。同时本文结合信号特点选取小波包函数和分解尺度并结合在不同频段的特点采取多阈值设置,这种方法以最大限度的保留有用信号、降低噪声为目的,极大地提升了激波信号降噪的效率。

2 信号主要成分的分析

超音速弹丸产生激波信号的基本原理如图1所示。子弹在超音速飞行过程中弹头部分会挤压前端空气造成弹头前部的气压在短时间内急剧上升,而在弹头的尾部空气非常稀薄,气压远远低于周围的正常气压。故而超音速弹丸经过声传感器时产生的响应信号在理想状态下应该是“N”型波^[2],如图1所示。由于子弹产生的激波信号的频

率一般在 10~30 Hz。但是实际过程中,由于受到噪声的影响,传感器采集到的信号并不具备明显的“N”型波的特征,如图 2 所示。

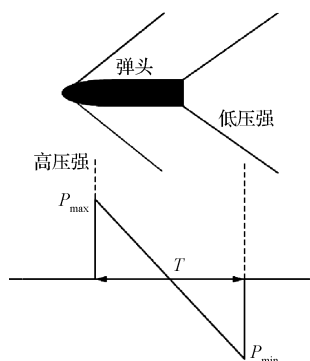


图1 激波信号产生原理

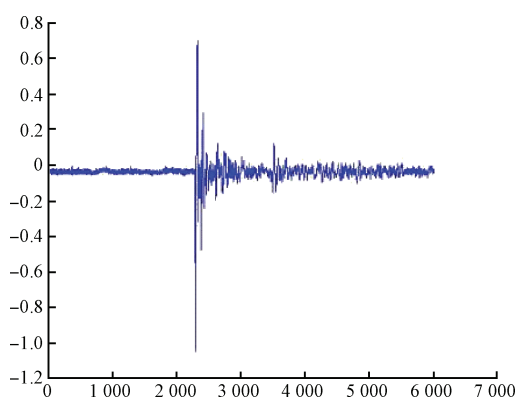


图2 传感器采集到的信号

从噪声的性质来看,采集到的信号掺杂的噪声主要包含加性噪声和卷积噪声。加性噪声是指传感器采集信号过程中接收到的环境噪声。卷积噪声是由信号传输通道的非理想性噪声造成的。在本文中主要结合靶场声信号的特点就加性噪声的处理展开讨论。在靶场参数测量的环境中,外界环境中的风声、高斯白噪声、脉冲干扰等因素一般具有非稳定性,这类噪声分布在频域上的各个频段内,并且具有不可预测性,这些信号同子弹激波信号一起被传感器采集到,导致信号的失真。

3 去噪方法的选取

20 世纪 60 年代发展起来的傅里叶变换是一种经典的去噪方法,其通过卷积的方式将时域信号辐射到由复正弦信号构成的正交空间从而得到信号的频域特征。通过分析噪声和有用信号在频域的不同特征以及分布情况,采用不同的滤波方法将信号和噪声分离,从而实现信号的去噪。离散傅里叶变换快速算法的出现极大的推动了傅里叶变换理论的成熟和应用的广泛。目前借助于傅里叶变换进行信号去噪的滤波算法主要有维纳滤波、卡尔曼滤波和自适应滤波等。但是傅里叶变换将信号进行时频变

换的前提是所处理的信号具有稳定的频域特性,其不能体现非平稳信号的特征。此外傅里叶变换的实质是将采集到的信号通过一个高通或者低通滤波器,实现对信号和噪声的分离,但实际情况下,由声传感器采集到的信号是非平稳信号,并且高斯白噪声、脉冲干扰等噪声信号的频谱分布在整个频谱范围内,故而使用傅里叶变换进行信号的去噪只能实现部分频段的去噪,信号所在频段仍然含有大量的噪声。利用傅里叶变换进行信号处理获得的是信号的整个频谱,而无法对局部时间段上信号的频谱进行分析处理,非平稳信号局部时间段上的频谱特性无法得到体现。傅里叶变换的上述特征使得其在对非稳态信号进行去噪处理过程中忽略信号的突变信息导致信号失真。故而在利用傅里叶变换对激波信号这种暂态信号进行处理时必须信号的良好去噪效果和信号保真之间做出选择。

20 世纪 90 年代,在傅里叶变换理论上发展起来的小波变换通过变化的时频窗口完成了对信号局部细节的分析,这使得小波变换成为对非平稳信号和突变信号进行分析处理的有利工具。在信号去噪方面,Mallat^[3]建立了小波变换的快速算法,小波变换对信号的时频分析得到了广泛的应用。利用该算法进行信号分析的一般方法如式(1)~(3)所示:

$$a_{j+1}(n) = \sum_k h(k-2n)a_j(k) \quad (1)$$

$$d_{j+1}(n) = \sum_k g(k-2n)a_j(k) \quad (2)$$

$$a_L(n) = 2^{L/2} \sum_k f(kT_s) \text{sinc}((n-k)T_s) \quad (3)$$

在以上过程中 h 和 g 分别为小波基以及尺度函数所生成的低通和高通滤波器,其具体表达式由所选定的小波基决定, $a_j(n)$ 是离散逼近信号,主要描述信号的低频部分, $d_j(n)$ 是离散细节信号,主要描述了信号的高频信息部分。小波对信号的多分辨率分析的基本理念是首先经过以上过程将信号分解为低频部分和高频部分,然后继续将信号的低频部分进行拆分,如图 3 所示,这样就将信号的不同频率成分提取出来并对其进行处理,再将处理后的信号进行重构从而完成了对信号的分析处理^[4]。

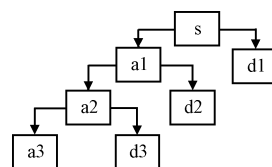


图3 3层小波分解树

小波变换仅仅对信号的低频部分进行分解,这就直接导致在利用小波变换进行信号分析时信号的高频频段的频率分辨率较差,而低频频段的时间分辨率较差。从结构图上来看,小波变换的多分辨率分析形成的是一个不完整的树状结构,如图 3 所示,即这种方法对信号频带的划分不均匀,故而在对信号的去噪过程中,使用这种方法无法

对处于高频带的噪声进行有效的处理^[5]。在这种情况下,人们引入了小波包对信号进行处理,其特点是在进行低频分解的同时,对信号的高频部分也进行分解,从而使得对信号的整个频谱实现均匀的分解,其分解结构呈现出对称的结构树,如图4所示。与小波变换相比,小波包是一种更为精细的分解方法,因而本文采用小波包对激波信号进行分析处理。

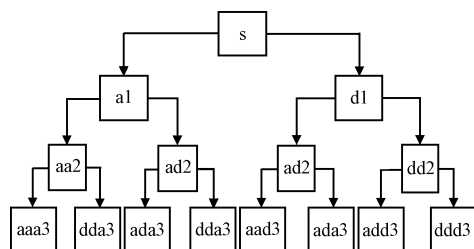


图4 3层小波包分解树

4 含噪信号的小波包分析处理过程

一般认为,在对信号进行小波包分解后,有用信号主要集中在少数小波分量上并且其小波系数较大,而由于噪声信号的无序性,噪声信号主要分布在大多数的小波分量上并且对应的小波系数较小^[6]。基于以上的原理,对小波系数进行阈值处理就可以实现消噪的目的。

利用小波理论进行信号去噪的一般步骤如下:

1)对采集到的信号进行小波分解。首先应该选择小波函数并确定分解层次,而后对信号进行小波变换。

2)对分解后信号的各个层次的系数进行阈值处理,由于信号中包含的噪声一般处于高频部分,故而在这部分主要是通过通过对各个尺度下的高频系数进行处理。

3)将处理后的信号进行小波重构。信号的去噪效果与小波函数、分解层次的选取、去噪阈值的选取都有着一定的关系,其中去噪阈值的选取将直接影响到信号的去噪质量^[7]。

4.1 小波包函数的选取

利用小波包函数对激波信号进行处理时,本文首先就小波包函数进行选取。选取小波包函数的一般原则是信号与小波包函数中的小波函数的波形越相近越有利于信号的小波包分解^[8]。常用的小波函数有 haar 小波包函数族、db 系列小波包函数族、coiflet 小波包函数族、symlets 小波包函数族等。本文对小波包函数的选取是分别用常用的小波包函数系对信号进行3层小波包降噪处理,比较其信噪比,而后确定信噪比最高的一组小波包函数系作为本文中对小波包函数族的选取。而后在该小波包函数族内部进行同阶小波包降噪处理,以信噪比为参考选取较为合适的小波包函数作为本文选用的小波包函数。

通过对各类小波包的小波函数和尺度函数的初步观察筛选出了与激波信号形状最为相似的 db 系列和 sym 系列作为信号小波包降噪所使用的函数。利用以上函数进行3层小波分解并进行全局软阈值去噪,而后重构后计算出了相应函数处理后的信噪比。如图5所示:菱形块代表的是使用 db1~db8 的小波包进行处理后信号的信噪比的值,五角星符是使用 sym1~sym8 的小波包处理后的信噪比的值。从以上图可以看出,在使用 db1 和 sym1、db2 和 sym2、db3 和 sym3 处理信号后所得的信噪比相同,故而本文选用 sym3 小波包处理信号。

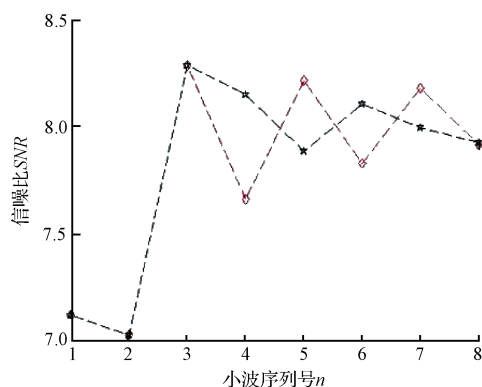
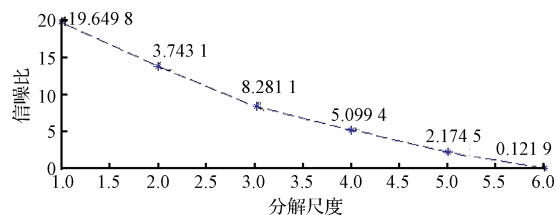


图5 db系列和sym系列处理信号后的信噪比

4.2 分解尺度的选取

在小波分解尺度的选择过程上,分别用 sym3 小波包进行第1~6层的小波包去噪处理,用信噪比选用最佳的小波包分解尺度,如图6所示。



(a) 不同尺度处理后信号的信噪比

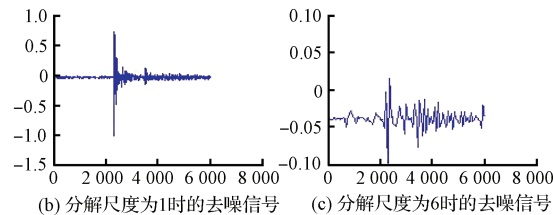


图6 不同尺度下处理过的信号以及信噪比

从上方的图形中,尺度1和2情况下对信号进行小波包分解可以看出,这两种情况下信号的信噪比较高,信号的有用信号得到了保留但是去噪效果不是很明显,故而不能清晰的辨别出‘N’型波。然而在尺度5和6情况下对信号进行小波分解,从其信噪比分别为2.1745和0.1219可以看出处理过的信号已经严重失真,并且从分解尺度为

6 的情况下对信号的处理可以看出,信号已经完全淹没在噪声之中,无法确定‘N’型波的位置,故而不能将分解尺度的值设置过大。尺度4 处理后的信噪比为 5.009 4,并且其处理后的信号可以较为清晰的分辨出‘N’型波,其与尺度为 3 时处理后的信号相比更为平滑,所以本文确定对基波信号的分解尺度为 4。

4.3 去噪阈值的设置

阈值去噪的基本原理是对小波系数进行阈值处理。目前,使用阈值去噪方法进行信号降噪处理一般有硬阈值去噪和软阈值去噪两种方法^[9],如式(4)和式(5)所示。

硬阈值法:

$$d_i = \begin{cases} d_i, & |d_i| \geq thr \\ 0, & |d_i| < thr \end{cases} \quad (4)$$

软阈值法:

$$d_i = \begin{cases} \text{sgn}(d_i)(d_i - thr), & |d_i| \geq thr \\ 0, & |d_i| < thr \end{cases} \quad (5)$$

阈值 thr 对于信号的去噪效果有着十分重要的影响。 thr 的值过小,那么只能滤除部分的噪声,信号终将会有很多的残余噪声。如果 thr 的值过大,处理过的小波系数经过小波重构后信号将会因为过去噪而造成失真。一般的,可以通过不同的规则设置信号的去噪阈值,例如硬阈值去噪是直接低于 thr 的系数设置为 0。将信号的全部系数按照同一个阈值进行处理是一种全局去噪方法^[10]。由于这种方法并没有结合信号和噪声在频域分布特点,故而使用这两种方法进行阈值去噪不可避免的会出现去噪效果差或者过去噪的现象。

由于本文采用的小波包分析方法已经将信号划分到不同的频段,故而可以根据信号和噪声在不同频段的分布状况设置不同的阈值对信号进行处理,这样将大大提高信号的去噪效果。小波包分析过程中常用的 4 种阈值设置准则包括固定形式阈值准则(sqtwolog)、自适应阈值准则(rigrsure)、启发式阈值准则(heursure)以及极小化极大阈值准则(minimaxi)。固定形式阈值准则(sqtwolog)和启发式阈值准则(heursure)是将全部的系数进行处理,这就相当于对各个频段都进行了消噪,虽然可以有效的消除噪声,但是必定会造成有用信号的流失。自适应阈值准则(rigrsure)和极小化极大阈值准则(minimaxi)是对部分系数进行处理,其去噪小波不明显但是有利于保留有用信号。一般认为激波信号的主要成分保留在低频段,而噪声主要保留在高频段,故而对低频段和中频段采用有益于保留信号有用成分的极小化极大阈值准则进行处理,而对于高频段采用具有强制去噪能力的启发式阈值准则进行处理。处理的结果如图 7 所示。

图 7 中图(a)是用 sym3 小波包进行全局阈值处理后的信号,图(b)是用 sym3 小波包进行多阈值处理后的信号。由这两张图可以看出在使用同一个小波包在相同分

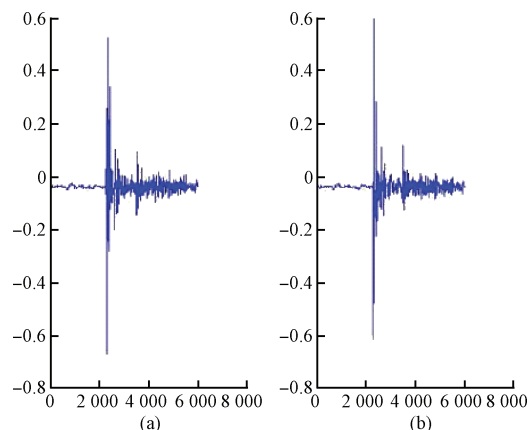


图 7 全局阈值和多阈值去噪信号

解尺度下进行信号去噪,多阈值去噪后的图形更为平滑,并且可以清晰地分辨出基波信号。

5 实验结果分析

本文通过对靶场实际采集到的数据分别按照以上提出的小波包算法、经典的维纳滤波算法、小波算法进行处理,并将处理过的数据代入靶场所用传感器阵列构成的数学模型中进行计算,得出的直径为 7.62 mm 弹丸的着靶坐标。同时将靶场后方的纸靶(200 mm×200 mm)读取的值作为实际测量值,分别对每种算法进行 200 次测量,其结果如表 1 所示。

表 1 精度对比表

滤波方式	实际测量 次数	误差≤5 mm 次数	百分比(%)
维纳滤波	200	105	52.5
小波去噪	200	131	65.5
小波包全局去噪	200	153	76.5
小波包多阈值去噪	200	183	91.5

由表 1 可以看出,使用小传统傅里叶变换滤波理论处理基波信号,整体上都要比用基于对信号进行处理,其能够提升对着靶坐标的测量精度。在小波理论中,直接使用小波函数对基波信号处理和使用小波包全局去噪处理后的信号,经过计算后其误差范围之内的百分比分别为 65.5%和 76.5%,其精度相差不大。但是多阈值小波包分析处理计算后的在误差范围之内的所占百分比可以达到 91.5%,远远高于传统傅里叶滤波算法和以上两种小波算法。由此可见使用小波包多阈值算法处理基波信号可以大大提高弹道测量系统的精度。

6 结论

本文通过介绍噪声对弹道参数测量精度的影响,指出了对基波信号进行预处理的必要性。在对信号去噪经典方法进行介绍的基础上发现小波包通过对信号频带的更

为精细的划分成为更为便捷的去噪工具。根据信号的特点选择了合适的小波包函数、小波分解尺度中并通过利用小波包基本原理结合多阈值去噪的优点提升对激波信号的去噪效果,进而提升了弹道参数的测量精度。

参考文献

- [1] 张西爽. 超音速子弹声源定位算法的研究和设计[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [2] 王黎明,赵英亮,韩焱,等. 基于 EMD 的弹丸激波信号处理方法研究[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(5): 103-104.
- [3] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [4] 张臣国. 小波分析在信号降噪中的应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [5] 赵满庆,周慧. 外弹道测量数据的小波阈值去噪方法研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(4):24-27.
- [6] 石明江,罗仁泽,付元华. 小波和能量特征提取的旋转机械故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(8):1114-1120.
- [7] 李红延,周云龙,田峰,等. 一种新的小波自适应阈值函数振动信号去噪算法[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(10):2200-2206.
- [8] 张磊邦,唐荣斌,蒋建波,等. 基于小波变换的心音特征值提取算法研究[J]. 电子测量技术,2014,37(6): 42-46.
- [9] 靳小强,王建斌,杜云鹏. 改进小波包阈值法在导波信号处理中的应用[J]. 国外电子测量技术,2012, 31(6):55-58.
- [10] 徐超. 基于形态滤波和提升小波变换的漏磁信号处理研究[J]. 国外电子测量技术,2013, 32(8):23-25.
- [5] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: A survey[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(11): 977-1000.
- [6] 冯水春,张学峰. 多子模板相关匹配算法的 FPGA 实现[C]. 全国第十届信号与信息处理、第四届 DSP 应用技术联合学术会议论文集,2006.
- [7] 张毅刚,曹阳,项学智. 静态背景差分运动目标检测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2010, 24(5): 494-499.
- [8] MORRONE M C, OWENS R A. Feature detection from local energy[J]. Pattern Recognition Letters, 1987, 6(5):303-313.
- [9] 杨杨,张田文. 一种基于特征光流的运动目标跟踪方法[J]. 宇航学报,2000, 21(2):8-15.
- [10] 李静沛,林智仁. 大规模线性排序支持向量机[D]. 台湾:台湾大学资讯工程研究所,2013.
- [11] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection[C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.

作者简介

孙萍萍,女,1993 年出生,研究生,主要研究方向为靶场测试技术。

E-mail: 1225692597@qq.com

作者简介

罗子安,1988 年出生,在读硕士研究生。主要研究方向为光电跟踪技术研究及相关硬件。

毛征,1959 年出生,工学博士,教授。主要研究方向为光电跟踪技术研究及相关硬件。

E-mail:maozheng@but.edu.cn

张辉,1982 年出生,工学博士。主要研究方向为光电跟踪技术研究及相关硬件。

(上接第 37 页)