

基于小波变换的外弹道测量数据处理方法*

冯 勇^{1,2}, 许梅生¹, 黄 燕³

(1 解放军炮兵学院, 合肥 230031; 2 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031;
3 解放军电子工程学院, 合肥 230031)

摘 要: 为去除外弹道测量数据中的噪声, 分析小波变换用于外弹道测量数据处理的基本原理, 结合某新型雷达和弹种的参数进行弹道测量数据仿真, 用小波变换的方法对仿真数据进行处理, 并与 Kalman 滤波方法的结果进行比较。仿真结果表明在弹道模型未知的情况下, 小波滤波方法的精度更高, 战场实用性更强。

关键词: 小波变换; 弹道数据处理; 卡尔曼滤波; 弹道数据仿真

中图分类号: TJ012.3 文献标志码: A

External Trajectory Measurement Data Processing Based on Wavelet Transform

FENG Yong^{1,2}, XU Meisheng¹, HUANG Yan³

(1 Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China;

2 Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China;

3 Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to remove the noise of external trajectory measurement data, the principle of external trajectory measurement data was presented based on wavelet, and simulation was conducted by means of parameters of a new type of radar and cannonball, the simulation data was processed by the wavelet transform method and was compared with the result of Kalman filtering method. Simulation results indicate that the precision and practicability of wavelet transform method are better than Kalman filtering method when the trajectory model is unknown.

Keywords: wavelet transform; trajectory data processing; Kalman filtering; simulation of trajectory data

0 引言

弹道数据的降噪处理是进行弹道分析和计算的基础。当前, 弹道数据的降噪方法主要有多项式拟合方法、Kalman 滤波等方法。多项式拟合法是一种不依赖于弹道数学模型的简单实用方法, 其缺点是精度低; Kalman 滤波方法根据有关弹道参数建立滤波方程, 而后进行滤波, 其精度较高, 但是要求已知弹道的相关参数, 其适用范围受到很大限制, 尤其是在进行弹道外推时有关弹道参数很难精确获取, 此时这种方法的精度将受到很大影响。

小波变换是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法, 具有多分辨率分析(multiresolution analyze)的特点, 在时频两域都具有表征信号局部特征的能力, 在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和

较低的频率分辨率, 很适合于探测正常数据中的瞬态反常现象, 所以被誉为分析信号的“显微镜”, 广泛应用于模式识别、数据和信号处理、图象处理、自动控制等领域^[1]。

1 小波降噪的基本原理

1.1 小波变换原理

小波变换的基本思想是用一族函数去表示或逼近一个信号或函数。这一族函数称为小波函数系, 由小波基函数通过平移或伸缩构成。若设小波基函数为 $\psi(t)$, 平移和伸缩因子分别为 a 和 b , 则小波序列定义为:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

对于任何函数或信号 $f(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 为平方可积的实数空间, 其小波变换为该函数与小波函数

* 收稿日期: 2010-10-29

作者简介: 冯勇(1975-), 男, 安徽亳州人, 讲师, 博士, 研究方向: 弹道计算、信号处理。

的内积:

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

式中, $\bar{\psi}(t)$ 是 $\psi(t)$ 的共轭。在实际应用中, 为方便计算机积分处理, 将函数或信号 $f(t)$ 进行离散化, 即将连续小波 $\psi_{a,b}(t)$ 及其变换 $W_f(a, b)$ 离散化, 离散情况下小波序列为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (3)$$

其相应的小波变换为:

$$D_f(j, k) = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = 2^{-\frac{j}{2}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \bar{\psi}(2^{-j}t - k) dt \quad (4)$$

1.2 小波降噪模型

一个含噪声的一维信号模型可以表示为:

$$f(i) = s(i) + \sigma e(i), (i = 0, 1, 2, \dots, n-1) \quad (5)$$

式中: $s(i)$ 为原始信号; $f(i)$ 为包含噪声的信号; $e(i)$ 为噪声信号。小波降噪模型的基本依据是: 1) 信号和噪声的小波系数在不同尺度上有着不同的特征表现; 2) 对于空间不连续函数, 大部分行为集中在小波空间的一小分子集内; 3) 噪声污染所有的小波系数, 且贡献相同; 4) 噪声向量是高斯形式, 它的正交变换也是高斯形式。

1.3 小波降噪过程

小波去噪过程一般由 3 个步骤来完成: 1) 小波变换; 2) 对小波系数进行非线性处理, 以滤除噪声; 3) 小波逆变换。步骤 2) 是信号处理的重点, 该步骤按照一定的准则对小波系数进行修改, 以在不损失过多信号的前提下达到降噪的目的。该非线性处理过程的算法有很多种, 如 Mallat 提出的模极大值处理算法、Xu 等提出的空域相关滤波算法、Donobo 提出的阈值滤波算法等^[1]。

鉴于小波阈值滤波算法实现最为简单, 计算量小, 文中采用此方法对小波系数进行滤波处理。阈值滤波算法分为硬阈值滤波法和软阈值滤波法, 其本质区别在于选取的阈值函数不同, 体现了小波系数的不同处理策略。阈值函数主要分为硬阈值函数和软阈值函数, 它们的基本思想都是取出小的系数, 收缩或保留大的系数。

硬阈值法的阈值函数如下:

$$\hat{\theta}_{j,i} = \begin{cases} 0 & |\omega_{j,i}| \leq t \\ \omega_{j,i} & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

一般来说, 阈值 $t = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 。这是 Donobo 在高斯噪声模型下, 应用多维独立正态变量决策理论得出的阈值, 即当维数趋于无穷大时, 噪声系数的幅值大于阈值 $t = \sigma \sqrt{2 \ln N}$ 的概率趋于零, 其中 σ 为噪声标准差, N 为信号的长度。 $\omega_{j,i}$ 表示信号在尺度 j 上的第 i 个小波系数。

软阈值法的阈值函数如下:

$$\hat{\theta}_{j,i} = \begin{cases} 0 & |\omega_{j,i}| \leq t \\ \text{sgn}(\omega_{j,i}) (|\omega_{j,i}| - t) & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

硬阈值去噪把信号的绝对值与指定的阈值进行比较, 小于或等于阈值的点变为零, 大于阈值的点保持不变; 而软阈值去噪, 即把信号的绝对值与指定的阈值进行比较, 小于或等于阈值的点变为零, 大于阈值的点变为该点值与阈值的差。一般来说, 硬阈值法往往使得滤波结果具有较大的方差, 而软阈值法使滤波结果有较大的偏差, 硬阈值法可以很好的保留信号或图像的边缘等局部特征, 但滤波结果会出现伪 Gibbs 现象, 而软阈值滤波结果则比较平滑, 但可能会造成边缘模糊等失真现象。

外弹道测量数据处理的目的主要是为了进行起点或落点的外推获取较为准确 1 个或几个弹道探测点的数据, 然后以此点作为弹道计算的起点, 而不是所有探测点的数据, 所以在进行起点选择时选择平滑效果较好探测弧段的中间部分, 因而软阈值算法造成失真现象对实际应用的影响不大。基于上述考虑, 所以文中选择软阈值算法。

1.4 小波基的选取

小波基的选取在降噪过程中也起着非常关键的作用, 最理想的小波基是能同时具有以下性质: 1) 对称性或反对称性, 具有对称性的小波在信号处理中可以防止相位畸变; 2) 较短的支撑长度, 支撑长度越长, 需要耗费更多计算时间, 而且产生更多高幅值的小波系数; 3) 正则性, 正则性好能获得较好的平滑效果, 减少量化或舍入误差的视觉影响, 但正则性好, 支撑长度就长, 运算时间就大, 因此这两者需要折衷处理; 4) 较高的消失矩, 消失矩越大就使更多小波系数为零, 但一般情况下, 消失矩越高, 支撑长度也越长, 因此在支撑长度和消失矩上也应该折衷考虑。

事实上, 因为没有哪个小波基函数能同时满足上面的几条准则, 所以在选择的过程中只能是有所侧重, 在理论的指导下进行多次的仿真, 对比降噪效果

才能最终确定最合适的小波基函数。

常用的小波基函数有 Haar、Daubechies、Biorthogonal、Coiflets、Symlets、Morlet、Mexican hat、Meyer 等,它们的性质和特点请参阅文献[1]。

根据大量的数据进行实验,在统计意义下利用 db4 小波进行 4 层分解时的效果最好,所以文中选择 db4 小波,分解的层数为 4。

2 弹道数据的小波滤波

测量系统获取的弹道数据主要由两部分组成:一是真实的弹道轨迹数据,二是测量系统的噪声。弹丸在空中飞行时还受到各种射击条件的影响,例如气温、气压和风的扰动等,使得真实的弹道轨迹数据与理论上的弹道数据存在一定的误差。所以在进行弹道数据处理的时候,不仅要剔除测量噪声,而且对射击条件带来的扰动也要进行相应的处理。用 Kalman 滤波方法进行弹道数据处理时要已知噪声的分布特征,实际上射击条件的扰动特性是无法准确预知的,而且在某些情况下测量系统的测量误差分布也很难获取,所以 Kalman 方法在实际应用上存在一定的限制。无论是测量噪声和各种扰动带来的噪声,它们在信号的表现形式上可以看成一种服从正态分布的高频分量,而理论上的弹道数据是一低频分量。所以,理论上讲,能够用小波变换进行弹道数据的处理。

小波变换用于弹道数据处理的步骤如下:

1)选取不同的小波基函数对弹道数据进行小波分解,通过筛选选择一种小波基函数,并确定要进行的分解层数 N ,然后对弹道数据进行 N 层的小波分解;

2)对小波分解的高频系数进行阈值量化处理,选择一种阈值方式,确定阈值,然后对第一层到第 N 层的高频系数进行阈值量化处理;

3)对处理后的弹道数据进行小波重构,根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第一层到第 N 层的高频系数进行数据的重构。

3 仿真实例

文中模拟某型炮兵侦察校射雷达探测 152mm 榴弹道数据,在此基础上进行仿真实验。

3.1 弹道数据的构造

选取目前广泛采用的四自由度质心运动微分方

程,忽略地表曲面和偏流影响,考虑科式效应。弹道方程具体形式如下^[2]:

$$\begin{cases}
 \frac{dv_x}{dt} = -C_b H(y) G(v_r, C) (v_x - w_x) - 2\Omega(v_z \sin\Delta + v_y \cos\Delta \sin\beta) \\
 \frac{dv_y}{dt} = -C_b H(y) G(v_r, C) (v_y - w_y) - g + 2\Omega(v_x \cos\Delta \sin\beta + v_z \cos\Delta \cos\beta) \\
 \frac{dv_z}{dt} = -C_b H(y) G(v_r, C) (v_z - w_z) - 2\Omega(v_y \cos\Delta \cos\beta - v_x \sin\Delta) \\
 \frac{dx}{dt} = v_x \\
 \frac{dy}{dt} = v_y \\
 \frac{dz}{dt} = v_z \\
 v_r = \sqrt{(v_x - w_x)^2 + (v_y - w_y)^2 + (v_z - w_z)^2} \\
 \tan\theta = \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} \text{ or } \theta = \arctan\left(\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}}\right)
 \end{cases} \tag{8}$$

式中,各代字的含义详见文献[2]。

积分的初始条件为:

$$t = 0 \text{ 时, } v_x = v_{x0} = v_0 \cos\theta_0, v_y = v_{y0} = v_0 \sin\theta_0, v_z = v_{z0} = 0, x_0 = y_0 = z_0 = 0.$$

射击条件在一定的范围内随机选择,弹道方程求解采用四阶龙格-库塔法。

为了模拟真实的弹道探测数据,文中采用某型炮兵侦察校射雷达的有关参数进行数据的变换和人为加噪,具体步骤如图 1。

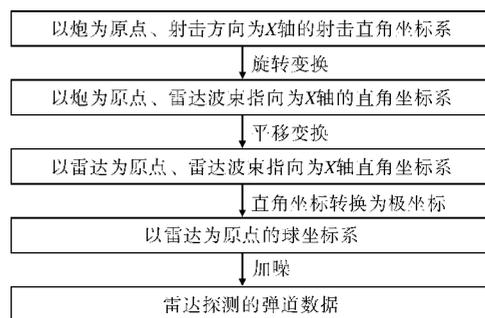


图 1 弹道数据的构造

为了分析表中各种因素对滤波结果的影响,保持一个参数变化而其它参数不变进行取样,这样得到在不同的采样间隔、不同的测量噪声、不同的采样点个数情况下的 8 组样本,每组样本的个数为 1000。

3.2 小波去噪实验结果及分析

文中采用 Matlab6.5 软件的小波工具箱,按 2 中

的步骤对8组样本进行实验,实验结果如表1所示。

表1 基于小波滤波的弹道数据处理结果

序号	取样说明			处理结果(均方差)/m		
	采样间隔/s	采样点数	探测噪声	X方向	Y方向	Z方向
1	0.2	40	标准	6.4803	6.7335	6.5368
2	0.3	40	标准	7.8616	7.5820	7.4124
3	0.4	40	标准	10.3335	10.3956	8.6277
4	0.3	40	标准	10.2365	10.4193	10.1997
5	0.3	60	标准	7.3652	7.4715	7.5044
6	0.3	80	标准	7.1453	7.3194	7.3127
7	0.3	60	2倍	14.0218	13.8372	13.4618
8	0.3	60	3倍	19.0482	19.9860	19.9551
备注	探测噪声服从正态分布,标准噪声指探测距离、方位角、仰角的均方差分别是20m,0.002rad,0.003rad。					

从表1可以看出,采用小波滤波方法进行弹道数据处理的效果较好,即使在探测噪声达到3倍标准噪声的情况下,其平均均方差也不大于20m。随着采样间隔的增加、采样点个数的减小以及探测噪声的增加,数据处理的精度略有下降。

为验证小波去噪的实时性,文中对处理时间进行了测试,采样点个数分别为40、60、80个时,每个样本的处理时间分别是15.6ms、20.2ms和29.8ms(CPU:2.2GHz,内存:512MB),结果证明该方法完全满足实时性的要求。

3.3 两种处理的结果对比

另外文中还与Kalman滤波方法的处理结果进行了比较,基于Kalman滤波的弹道数据处理方法见参考文献[3]。文中在两种情况下,进行了基于Kalman滤波的弹道数据处理实验,一是在弹道参数(弹道系数、气象条件、弹道条件)无误差,二是弹道参数存在一定误差(误差设定为5%)。实验样本同3.2,两种情况下的统计实验结果如表2所示。

表2 基于Kalman滤波的弹道数据处理结果

序号	均方差(弹道参数无误差)/m			均方差(弹道参数有误差)/m		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
	1	5.8756	6.5335	6.2138	10.0270	11.0351
2	6.8724	7.1134	7.0897	12.4656	14.22725	15.0065
3	9.2101	0.91052	7.9854	19.5468	19.6644	13.5404
4	9.1874	0.91074	8.0121	20.3125	20.5917	19.8766
5	6.5360	0.68180	6.9230	13.5537	12.9645	12.8283
6	6.0228	0.70534	6.3245	12.854	13.0010	14.0125
7	10.0567	12.4075	11.0274	28.7464	27.9431	26.6454
8	13.0650	14.2185	15.02033	30.0402	31.547	32.0042

可以看出,在弹道参数无误差的情况下,基于Kalman滤波的精度略高于小波滤波的精度,但是当弹道参数出现误差时,Kalman滤波的精度大幅下降,其精度远低于小波滤波的精度。在实际处理过程中,特别是在炮兵实战过程中,很难获取准确的弹道参数,因此Kalman滤波的精度在实际条件下将会变差,使用范围受到很大限制,相反,基于小波滤波的处理方法却不受弹道参数的影响,实用性好。

为了直观的比较两种方法的处理效果,随机抽取了一个样本的处理结果,各种情况下的数据处理误差如图2所示。

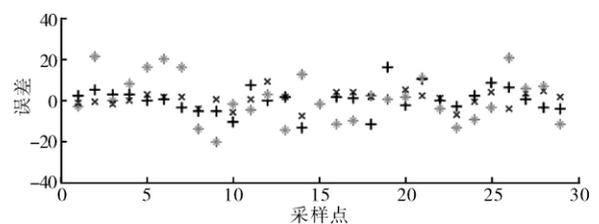


图2 不同情况下数据处理误差

“+”、“x”、“*”分别表示采用小波滤波、弹道参数无误差情况下Kalman滤波、弹道参数有误差情况下Kalman滤波结果的误差。从图中可以看出在弹道参数无误差时,Kalman滤波的精度最高,但在弹道参数存在误差时,小波滤波的效果明显优于Kalman滤波的滤波效果。

4 结论

通过对小波变换算法的理论分析和仿真试验,证明了小波变换在外弹道测量数据处理上具有精度高、实时性强的特点。特别是在弹道模型和噪声分布特征未知条件下,该方法的精度远高于目前广泛采用的Kalman滤波方法的精度,战场实用性更好。

参考文献:

- [1] 陈仲英,巫斌.小波分析[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 王敏忠.炮兵应用外弹道学及仿真[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [3] 戴耀,汪德虎,王建明.舰炮弹道估计的卡尔曼滤波算法[J].火力指挥与控制,2003(2):29-31.
- [4] 胡昌华,李国华,周涛.基于MATLAB 7.X的系统分析与设计.小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2008.
- [5] Mallat S G. A wavelet tour of signal processing[M]. San Diego: Academic Press, 1998.