

一种精确判定多普勒信号极值点位置的方法

刘 丹 张丕状 马春燕

中北大学信息探测与处理技术研究所, 山西 太原 030051

摘要 求解多普勒信号频率是测量高速运动目标速度的基础。极值法测量弹丸运动速度时,极值点携带了多普勒信号瞬时频率信息,所以要精确估算弹丸回波信号的频率,找准极值点的位置至关重要,传统的极值法测量精度受方法限制。提出采用二次曲线拟合的方法对回波信号进行去噪处理,根据二次函数求极值点的数学原理求出所有极值点,并对分段拟合算法产生的无效极值点进行准确剔除。通过分析实际测量的弹丸回波信号,提高了判定极值点位置的精度,为高精度测量运动目标速度奠定了基础。

关键词 探测器; 弹丸运动; 多普勒信号; 曲线拟合; 极值点

中图分类号 TJ012.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.070401

A Precise Method to Estimate Location of Doppler Signal's Extreme Value Points

Liu Dan Zhang Pizhuang Ma Chunyan

Institute of Signal Capturing and Processing Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Solving the frequency of Doppler signal is the foundation for speed measurement of high-speed moving target. When measuring speed of the moving projectile by extremum, the extreme value point carries instantaneous frequency information of the Doppler signal. So it is very important to find the location of extreme value point when estimating the frequency of projectile echo signal accurately. The measurement precision of traditional extremum method is more restricted. A method of quadratic curve fitting is proposed to deal with the noise of echo signal, all the extreme value points are found out according to the principle of quadratic function, and invalid extreme value points produced by the piecewise fitting method are eliminated. Through the analysis of actually measured projectile echo signal, the accuracy for determining the position of extreme value point is improved and foundation for high precision measurement of moving targets is laid.

Key words detectors; projectile motion; Doppler signal; curve fitting; extreme value point

OCIS codes 040.1880; 350.7420; 070.2615; 070.4560; 070.7345

1 引言

弹丸运动速度的高精度测量是测量弹丸膛内其他运行参数的基础。在众多的测试方法中,利用毫米波干涉仪对弹丸膛内运动参数进行测试,可以得到膛内弹丸的瞬时速度等即时运动信息,毫米波干涉仪测试法是一种安全性较好、精度较高、使用方便的测试手段^[1],近几年来在小口径枪械内弹道测试和大口径火炮弹丸膛内运动参数测试方面的应用日益广泛。毫米波干涉仪对膛内弹丸速度等参数的测量,主要是依据多普勒原理对膛内弹丸的回波信号进行分析处理,提取出瞬时频率即多普勒频移,进而得到膛内弹丸的速度等运动参数信息。

目前,国内外研究人员根据多普勒原理已经提出不少速度测量的方法,主要有时域、频域及时-频域分析算法等。传统的时-频域法计算量一般较大,频域法大多针对单频信号进行处理。极值法测量弹丸运动

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-01-11; 网络出版日期: 2015-06-19

基金项目: 国防科工局项目

作者简介: 刘 丹(1989—),男,硕士研究生,主要从事信息探测与处理等方面的研究。E-mail: 164812543@qq.com

导师简介: 张丕状(1965—),男,教授,主要从事信号处理、总线及接口技术、嵌入式系统应用等方面的研究。

E-mail: zhpzh@163.com

速度属于时域法。要精确估算信号频率,找准极值点至为重要,传统的极值法测量精度受方法限制。文献[2]所述改进极值法利用能量重心法校正极值,该方法只适用于低速运动目标的速度测量。文献[3]提出一种区域极值法,通过对心电信号进行二次B样条小波变换,然后确定极值点位置,该方法的难处在于选择合适的小波变换尺度并准确定位小波系数峰值点。文献[4-8]虽然不是采用极值法测量速度,但所用方法都比较复杂,而且适用范围较小。

本文提出了采用二次曲线分段拟合的方法对弹丸回波信号进行去噪处理,根据二次函数求极值点的数学原理,每段曲线内必有唯一的极值点,可以无漏地求出所有极值点。通过分析实测弹丸回波信号,针对分段拟合求极值点产生误判的情况,利用单调性一致原理,对误判的极值点进行准确剔除,达到准确判定极值点位置的目的,为高精度测量运动目标速度奠定基础。

2 基本原理

2.1 最小二乘法(LS)

曲线拟合是图像分析中非常重要的描述符号,研究中实测信号进行二次曲线拟合是通过最小二乘法原理实现的。

最小二乘法是一种使估计偏差的平方和达到最小的参数估计算法。其基本思想是给定一组实验数据,这些数据往往是有序数对,根据误差平方和最小化原则,找出这些数据的最佳函数匹配^[9]。

最小二乘法的数学原理如下^[10],假使曲线

$$y^*(x) = \sum_{j=0}^n c_j^* \phi_j(x) \quad (1)$$

使得(2)式成立:

$$\sum_{i=0}^m \left[\sum_{j=0}^n c_j^* \phi_j(x_i) - y_i \right]^2 = \min_{\{c_j\}} \sum_{i=0}^m \left[\sum_{j=0}^n c_j \phi_j(x_i) - y_i \right]^2, \quad (2)$$

则称曲线 $y^*(x)$ 为曲线族 (x_i, y_i) 中按最小二乘确定的对于数据 (x_i, y_i) 的拟合曲线。由线性无关向量组 $\phi_j = [\phi_j(x_0), \phi_j(x_1), L, \phi_j(x_m)]^T (j=0 \sim n)$ 作为基底构成一个 R^{m+1} 子空间,记 $A = (\varphi_0, \varphi_1, L, \varphi_n)$, $\mathbf{y} = (y_0, y_1, L, y_m)^T$ 。向量组满足条件(2)式的拟合曲线 $y^*(x)$ 存在且唯一,并且从方程

$$A^T A \mathbf{c}^* = A^T \mathbf{y}, \quad (3)$$

中解出 $\mathbf{c}^* = (c_0^*, c_1^*, \dots, c_n^*)^T$ 即可得到拟合曲线(1)式。

最小二乘法的显著特点是仅需要假设一个信号模型,而不必知道观测数据的概率分布,因而最小二乘法比其他参数估计算法更易于实现。

2.2 极值法

在多普勒信号处理方法中,极值法通过记录信号极大值和极小值的位置或时间来得到极值点的时间间隔,即信号的半周期。根据信号周期与频率的关系可以估计出信号的频率。信号的极大值和极小值点是信号一阶导数为零的点,是信号时域特征变化的综合体现。这些极值点携带了信号的瞬时频率信息。

极值点时间序列 $x(i)$ 由信号 $S(k)$ 进行一阶求导并判断符号变化得到,若 $S'(k)=0$,且 $S'(k-1)<0$, $S'(k+1)>0$,则为极小值点;若 $S'(k)=0$,且 $S'(k-1)>0$, $S'(k+1)<0$,则为极大值点。极值间隔序列 $\{\text{extr}(i)\}$ 表征两个极值间隔时间段上信号 $S(k)$ 的平均频率。它是极大值极小值法所能获得的最短时间段内的相位变化特征。对传统的极值法来讲,序列 $\{\text{extr}(i)\}$ 表示信号的半周期具有瞬时频率的特征,则信号的瞬时频率可表示为

$$f(i) = 1/[2\text{extr}(i)]. \quad (4)$$

3 实测信号处理

弹丸膛内运动是一个短时变速过程,穿越雷达波束的回波信号是频率随时间快速连续变化的非平稳信号,由于弹丸在运行过程中管身的振动等外界因素使弹丸回波信号产生严重的噪声,极值法高精度求解信号频率需要做两项工作,一是对实测信号进行去噪处理,二是对去噪后的信号求极值运算,并准确剔除误判的极值点。

3.1 二次曲线拟合对信号进行去噪处理

采用二次曲线拟合对实测弹丸回波信号去噪,逼近有效的回波信号特征。弹丸回波信号的基本模型符合正弦波的信号特征。对实测雷达数据采取分段拟合,将信号波段用抛物线逼近拟合,按照样点在均值线两侧分布均匀和多项式阶数尽可能低的准则^[11],采取二次多项式函数进行分段拟合。根据二次函数求极值的数学原理,每段曲线内必有唯一的极值点,这样可以无漏地求出所有极值点。通常认为(5)式给出的二次多项式拟合程度较好。

$$u(t) = a_1 t^2 + a_2 t + a_0, \quad (5)$$

式中 $u(t)$ 是每段数据拟合出的抛物线, $a_i (i=0,1,2)$ 是拟合多项式的系数。将拟合出的数据段相加即可认为逼近弹丸回波信号的有效信号 x_i :

$$x_i = u_1(t) + u_2(t) + \cdots + u_n(t), \quad (6)$$

式中 n 为信号分段数,依据信号中每段类抛物线点数和信号总长度计算确定。

为有效去除噪声信息并使回波信号有效信息不丢失,数据窗口长度的选择是关键。窗口长度应以信号最短类抛物线的数据长度为宜。分析实测弹丸回波信号,最短类抛物线的数据点约为 25 个,故选窗口长度为 25。而且拟合时第一段拟合数据长度为 25,从第二段起,使每段原始数据与前段拟合好的数据重合一部分再次拟合形成第二段拟合数据,后面以此类推。

从第二段起,每段数据可表示为

$$x_{i+1} = u'_i + x', \quad i = 1, 2, \cdots, \quad (7)$$

$$u'_i = u_i \left\{ \begin{array}{l} \{i \times 25 - [(M-1) + (i-1) \times M]\}: \\ \{(i-1) \times 25 + [(25-M) - (i-2) \times M]\} \end{array} \right\}, \quad x' = x \left\{ \begin{array}{l} [i \times 25 - (i-1) \times M + 1]: \\ \{i \times 25 + [(25-M) - (i-1) \times M]\} \end{array} \right\}, \quad (8)$$

式中 i 从 1 开始计起, M 是每段数据从上一段拟合后的数据中取出后面的点数, u_i 是前一段拟合后的数据, u'_i 是从 u_i 中取出的后 M 个点的数据, x 是原始数据, x' 是原始数据中取出的 $(25-M)$ 个点的数据, x_{i+1} 是从第二段起每段要拟合的总数据。则拟合后信号总数据为

$$u_i = \sum_{i=0} u_i(t). \quad (9)$$

经过拟合处理后,信号的噪声信息得到有效去除。

3.2 对极值点的校正处理

分段拟合使弹丸回波信号去噪后出现一个问题,即在分段信号相加的端点处出现两个凸起点,即奇点。这两个点的横坐标点数只相差一个数据。特别是影响单调性的奇点,在求极值运算时,均被误判为回波信号极值点,对后续回波信号频率的准确求解产生严重影响。为此需准确剔除求出的无效极值点。

对数据端点的处理利用了函数在任意点左右两侧单调性一致原理进行判断。

设信号 $S(k)$ 任意拟合端点处的两个凸起点分别为 Q_1 、 Q_2 , 其横坐标值为 x_0 、 x_0+1 。对该段拟合函数分别在区间 $[x_0-m, x_0]$ 与区间 $[x_0+1, x_0+m+1]$ 内求导判断单调性,其中 m 是小于 25 的任意点数,如果 $S'(k) > 0, k \in [x_0-m, x_0]$ 且 $S'(k) > 0, k \in [x_0+1, x_0+m+1]$, 或者 $S'(k) < 0, k \in [x_0-m, x_0]$ 且 $S'(k) < 0, k \in [x_0+1, x_0+m+1]$, 则信号在区间 $[x_0-m, x_0]$ 、 $[x_0+1, x_0+m+1]$ 内单调性一致,可认为端点 Q_1 、 Q_2 不是有效的极值点,即可排除,这样可以将拟合产生的无效极值点准确剔除。

4 验证分析

图 1 为利用毫米波干涉仪采集到的实际弹丸回波信号,只截取其中一段进行说明。横坐标为数据点数。图中在类似正弦波的信号包络上有很多噪声,信号处理的目的是将这些噪声信息最大程度地消除并准确求出处理后信号的极值点。

4.1 二次曲线拟合对信号去噪处理的验证

图 2 是采用二次曲线拟合对回波信号进行去噪处理后(红色曲线)与原信号的对比。

从图 2 可以看出,经过二次曲线拟合对实测弹丸回波信号去噪处理后,信号信息得到改善。图 3 是对信号局部放大的效果对比,可以明显看到,信号边缘数据得到有效剔除,实现了去噪的目的;但同时也可以看

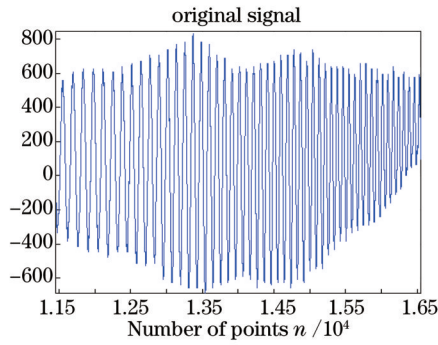


图1 雷达采集到的弹丸回波信号
Fig.1 Projectile echo signal collected by radar

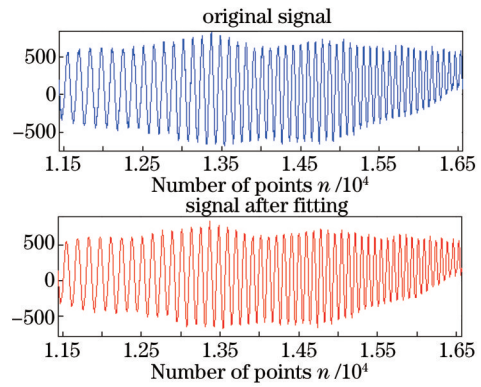


图2 拟合去噪后的信号对比图
Fig.2 Signal contrast after fitting

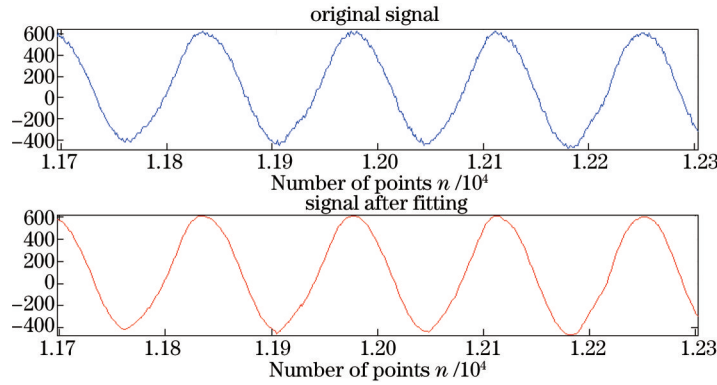


图3 局部放大对比图
Fig.3 Zoom in contrast figure

出,拟合后的信号有个别凸起点出现。

4.2 对极值点校正处理的验证

图4是对去噪处理后的信号进行初次求极值点的显示图。

从图4可以看到,采取分段拟合对信号去噪后产生的凸起点,因被误判为回波信号的极值点而被标出,这会对后续精确求解回波信号的频率产生严重影响,需进一步对误判的极值点进行有效剔除。

图5是对误判极值点剔除后的示意图。从图中可以看出,因分段拟合去噪被误判为信号极值点的无效极值点得到准确剔除,同时实现了去噪后信号有效极值点的准确求解,达到了预期目的,为下一步准确求解回波信号频率奠定了基础。

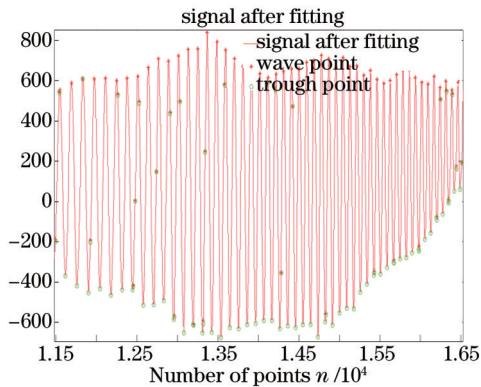


图4 初次求极值点的信号图
Fig.4 Figure of extreme value points solved for the first time

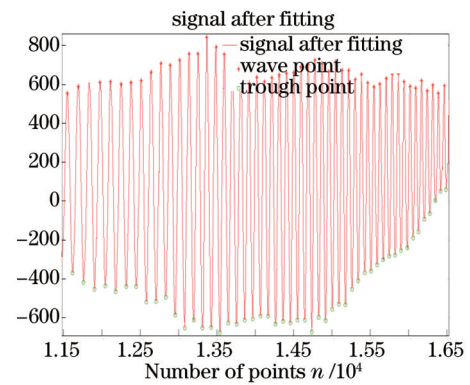


图5 剔除无效极值点后的信号图
Fig.5 Signal patterns after invalid extreme value points are eliminated

5 结 论

针对极值法精确求解弹丸回波信号瞬时频率的问题,提出了采用二次曲线拟合的方法对原始弹丸回波信号进行去噪处理,根据二次函数求极值点的数学原理求出所有极值点,并对分段拟合算法产生的无效极值点进行准确剔除。通过实测回波信号分析验证,达到了预期目的,提高了极值点位置判定的精度,为弹丸运动速度的高精度测量提供了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Wang Liming, Zhao Xin, Liu Hongtao, *et al.*. Method of test data processing on microwave interferometer[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2004, (4): 63-66.
王黎明, 赵 昕, 刘洪涛, 等. 微波干涉仪测试数据处理方法[J]. *火炮发射与控制学报*, 2004, (4): 63-66.
- 2 Wei Yuanyuan, Yao Jinjie. Velocity measurement of moving target based on wavelet denoting and improved extremum method[J]. *Satellite Computer Information*, 2010, 26(7-1): 217-218.
魏媛媛, 姚金杰. 基于小波去噪和改进极值法的动目标速度测量[J]. *微计算机信息*, 2010, 26(7-1): 217-218.
- 3 Zou Jin, He Lesheng. Detection of ECG QRS wave based on region extreme value method[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2012, 35(3): 100-106.
邹 进, 何乐生. 基于区域极值法心电图 QRS 波的检测[J]. *电子测量技术*, 2012, 35(3): 100-106.
- 4 Zhou Jinnan, Wu Zhanjun, Fan Zhe, *et al.*. Research on Kalman filter algorithm for vehicle laser Doppler velocimeter[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1102006.
周金男, 邬战军, 范 哲, 等. 车载激光多普勒测速仪的卡尔曼滤波算法研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1102006.
- 5 Yuan Shuyun, Liu Shouxian, Wang Detian, *et al.*. Displacement mode analysis method for data processing of photonic Doppler velocimetry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030602.
袁树云, 刘寿先, 王德田, 等. 光纤多普勒测速仪位移模式数据处理新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030602.
- 6 Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, *et al.*. Measuring multiple targets velocities with just one probe of photonic Doppler velocimetry[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105004.
李建中, 刘寿先, 刘 俊, 等. 光子多普勒测速仪的单探头多目标测速能力研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105004.
- 7 Sui Xiaolin, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, *et al.*. Research on an all-fiber structure velocity measurement coherent lidar[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208007.
眭晓林, 周寿桓, 赵 鸿, 等. 一种全光纤结构的相干激光测速雷达研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208007.
- 8 Gu Yaohui, Zhang Yan, Jiao Xiang, *et al.*. Measurement for retardation of wave plates using the relative angle method[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(9): 0908002.
谷耀辉, 张 燕, 焦 翔, 等. 相对角度法测量波片相位延迟量[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908002.
- 9 Tian Long, Liu Zongtian. Piecewise linear fitting of the least-square method[J]. *Computer Science*, 2012, 39(6A): 482-484.
田 垌, 刘宗田. 最小二乘法分段直线拟合[J]. *计算机科学*, 2012, 39(6A): 482-484.
- 10 Cao Jian, Lin Tao, Xu Xialing, *et al.*. Monitoring of power system harmonic/inter-harmonics based on least squares algorithm and time frequency transform[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(10): 1-6.
曹 健, 林 涛, 徐遐龄, 等. 基于最小二乘法和时频原子变换的谐波/间谐波测量算法[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(10): 1-6.
- 11 Hu Canyang, Chen Qingjun. Research on baseline drift using least-square and EMD[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(3): 162-167.
胡灿阳, 陈清军. 基于 EMD 和最小二乘法的基线漂移研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(3): 162-167.

栏目编辑: 吴秀娟