

一种大口径身管内弹道目标速度修复方法

李美兰, 姚金杰, 韩 焱, 孙晓阳

(中北大学 信息探测与处理技术重点实验室, 太原 030051)

摘要: 在管状结构内, 身管、管内运动目标、反射板和毫米波干涉仪等多目标的强烈联合振动使得利用毫米波干涉仪测试获得的目标运动速度曲线出现多段缺失, 影响了管内运动目标速度测量; 针对该问题, 提出了一种基于阈值判别和粒子滤波优化的大口径管状结构内目标速度修复方案, 该方案是在对实际信号的小波去噪预处理上, 通过短时傅里叶变换 (STFT) 进行时频分析, 得出速度曲线, 针对速度曲线的多段缺失采用阈值判别法进行初步修复, 再利用粒子滤波进一步修复与优化; 实验结果表明, 提出的方法能够有效解决目标速度缺失现象, 实现大口径身管内目标速度有效测量, 并且能适应处理多种速度级别的雷达信号。

关键词: 阈值判别; 异常点; 三次样条插值; 粒子滤波

A Method of Repairing Ballistic Target Speed in Large Diameter

Li Meilan, Yao Jinjie, Han Yan, Sun Xiaoyang

(State Key Laboratory of Electronic Testing and Proceeding Technology,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the tubular structure, the multi-objective strong joint vibration of the barrel, the moving target in the pipe, the reflector and the millimeter-wave interferometer makes the target moving speed curve obtained by the millimeter-wave interferometer test have multiple segments missing, which affects the measurement of the moving target velocity in the pipe. In order to solve this problem, a target speed restoration scheme based on threshold discrimination and particle filter optimization in a large-diameter tubular structure is proposed. The proposed scheme is based on the short-time Fourier transform (STFT) for time-frequency analysis, the velocity curve was obtained. The multi-segment loss of the velocity curve was initially repaired by the threshold method, and then the particle filter was used to further repair and optimize the velocity curve. The experimental results show that the proposed method can effectively solve the problem of target speed loss, effectively measure the target speed in large bore tube, and can adapt to radar signals processing at various speed levels.

Keywords: threshold discrimination; outliers; cubic spline interpolation; particle filter

0 引言

弹丸运动速度是内弹道测试的重要参数, 是测试人员判断发射药工作性能、评价枪炮等身管武器内弹道性能的重要技术指标。利用毫米波干涉仪测速时, 主要通过毫米波信号的发射、二次反射接收和干涉信号处理等流程, 完成运动目标的速度参数测量, 如图 1 所示, 对于速度的精确计算主要放在信号处理部分进行。随着传统发射身管和新型电磁装备的测试口径不断增大, 发射动能不断提高, 身管、弹丸、反射板和毫米波干涉仪强烈振动, 这种多目标联合振动使得发射的毫米波很难全部进入管状结构内部且照射到运动体上, 最后导致输出的回波信号中出现多段

信噪比低、甚至大段的时间出现没有有效多普勒信号的情况, 大幅度降低了毫米波干涉仪测速性能, 极大影响了^[1]毫米波干涉仪在大口径、强振动条件下的工程应用。程诚^[2]等从硬件装置的角度对电磁轨道炮内弹道速度进行了研究, 并阐述了经过处理测速雷达数据所得到速度曲线出现缺失段的部分原因, 但没有提出具体的解决办法。对于雷达信号处理采用的短时傅里叶变换 (STFT)、S 变换、多项式调频小波变换 (PCT) 等方法具有很好的瞬时频率估计精度, 但是对于缺失段的修补及速度曲线的优化的作用很小, 魏媛媛^[6]等在数据预处理方面进行了研究, 一定程度上降低了噪声, 但是缺失问题依然存在。

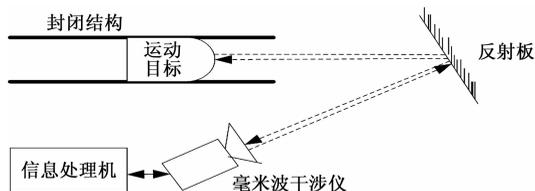


图 1 基于毫米波干涉仪的管状结构内运动目标速度测量示意图

收稿日期:2017-11-29; 修回日期:2018-01-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(GCKY2014408C001)。

作者简介:李美兰(1994-),女,山西朔州人,硕士研究生,主要从事雷达信号处理方向的研究。

姚金杰(1982-),男,山西晋城人,硕士生导师,主要从事信号处理、微波与毫米波技术及位置服务与应用方向的研究。

韩 焱(1957-),男,山西太原人,教授,博导,主要从事信号处理与识别、图像处理等方向的研究。

针对该问题, 目前主要依靠人工修复的方法对管状结

构内运动目标速度曲线进行补偿, 即根据人为的主观感觉去对所测得的速度曲线进行补偿, 存在的测试误差很大, 受人为经验影响因素大等问题。因此, 本文主要提出了一种基于阈值判别和粒子滤波优化的大口径身管内运动目标速度修复方案, 即首先针对大口径身管内运动速度信号特点, 进行信号预处理, 即进行普通的滤波, 像直接经过低通和高通滤波器, 或是小波去噪的方法; 其次通过短时傅里叶的时频分析方法求出实际的管状结构内运动速度数据, 在此基础上采用提出的多目标联合阈值判别法找出异常点, 利用速度模型的走势去掉异常点, 最后提出粒子滤波以期解决多目标联合振动条件下大口径身管内运动目标速度有效测量问题。

1 运动速度信号预处理

在管状结构内运动目标速度测量时, 由于多普勒雷达测量的运动目标速度很快, 会带动管内的气流振动, 引发身管、目标、反射板和毫米波干涉仪的联合振动^[3-6], 影响到毫米波干涉信号质量, 使得雷达回波的某些频率成分的能量比较小, 所以在用短时傅里叶变换求速度时, 这些能量小的频率成分会缺失, 导致速度测量值很小, 明显偏离正常的速度值, 称之为缺失部分。

首先从采集到的多普勒信号中截取有效的信号段, 然后进行小波去噪的处理, 对于小波的使用最重要的是阈值的选取, 分为软阈值和硬阈值, 针对实际情况选择适合的阈值选择标准, 共有 4 种标准, 最简单的就是固定阈值, 根据经验选取一个合适的阈值进行滤波, 它的局限就在于不能根据博得发展趋势自适应修改阈值; 无偏似然估计是根据似然估计的四项求出一个无偏阈值, 属于软阈值范畴; 极值阈值是根据极大极小值原理找一个阈值使得方差最小, 相应的会增加计算量; 还有一种叫做启发式阈值, 属于无偏似然估计和固定阈值折中的一种阈值选择标准, 但是不适合信噪比非常小的情况。在处理实际信号时, 一般使用的是 db6 类型的信号。再将去噪后的信号进行短时傅里叶变换求出各个时间段对应的信号频率值, 进而求出速度值。短时傅里叶变换属于时频分析方法的一种, 它的基本原理是从时域上利用窗函数将信号分成多个小时段的信号, 窗函数可以是高斯窗、汉宁窗及汉明窗等等, 可以根据实际情况的需要选择合适的窗。在理论上将分解出的每一小段信号看成是稳定信号, 然后再对每一小段小信号进行傅里叶变换, 得到每一小段信号的频谱, 再求出每一段信号对应频谱的最大值, 即最大能量对应的频率值, 将该频率值作为该一小段信号的频率值, 再利用多普勒效应的原理求出该多普勒频率所对应的速度。但是由于各种因素, 会导致求出的速度数据, 在运动目标出膛口时刻出现速度缺失段, 如图 2 所示, 观察可以发现, 此段处于发射后 10 ms, 目标运动速度快要达到最大值点的时期, 出现运动速度测量不准、速度缺失等问题, 如果直接避开速度缺失段根据整段速度曲线对其进行拟合就会削掉原来的速度变化趋势,

使其变得平缓并且会将一开始速度抖动的变换趋势去掉, 在失去实际速度曲线趋势的基础上会降低了原有的加速度, 严重影响测量精度, 并且会让最后的速度曲线结果失去实际的意义, 只是单纯的数据平滑集合。

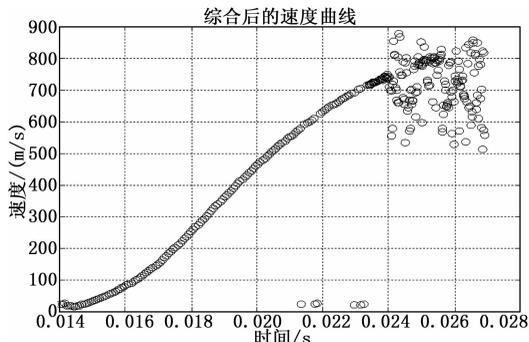


图 2 运动速度局部段缺失

针对大口径身管内目标运动速度测量中出现的多段缺失部分, 首先要对每段信号进行方差的求解, 然后通过阈值判别法找到缺失部分所在的位置, 再利用根据实际曲线走势的近似值去代替缺失的部分, 具体实现步骤如下:

1) 首先将 N 个数据点分成 m 组, 分别对每个小组内的数据求方差:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m x_i \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

2) 求所有小组方差的平均值, 以 2.5 倍 (经验所得) 的方差平均值作为阈值判别出缺失部分所在的小组;

3) 通过上一个步骤可以找到异常点所在的小组, 接下来是处理每一小组内的数据, 从中找出具体的异常点所在位置。首先求出每一小组中的均值, 以均值的十分之一作为阈值去循环判断, 若找到的异常点后一个值大于前一个值, 那么就将其异常点的值替换成与它前后相邻两个值的均值, 否则用前一个值去代替。

2 运动速度修复及优化

针对阈值判别后的大身管内目标运动速度信号, 采用粒子滤波 (PF)^[7-8] 进行速度修复和补偿, 该方法的核心思想是对空间中的随机样本抽样得到一个粒子集合, 并为每个粒子赋予相应的权值, 再利用这些权值和带权值的粒子去表示随机变量所拥有的后验概率密度函数。当采样的粒子数不断增加时, 后验概率密度函数也逐渐逼近传统函数所表示出的概率密度函数, PF 的估计值与贝叶斯最优估计值逐渐靠近。

粒子滤波的表达式^[9] 如下公式:

$$x_{k+1} = \mathbf{F}x_k + \mathbf{B}u_k + \delta_k \quad (3)$$

$$y_{k+1} = \mathbf{H}x_{k+1} + \varepsilon_k \quad (4)$$

式 (3) 为粒子滤波的状态转移方程, 式 (4) 则为对应的观测方程, x_k 表示 k 时刻所处的状态, y_{k+1} 表示 $k+1$ 时刻系统的观测值, u_k 是系统的控制量, δ_k 以及 ϵ_k 则分别表示系统的模型噪声以及系统的观测噪声, F 、 B 、 H 分别为对应的系数矩阵。在这里的 δ_k 和 ϵ_k 的协方差值分别是 1, 系统控制量 u_k 为 0, 根据加速度、速度、位移之间的关系得到, $F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B = 1$, $H = 1$ 。

PF 的运算主要分为预估阶段和校正阶段。在预估阶段, 要先依据前一时刻的状态 $x(t-1)$ 以及它的概率分布抽样产生一系列大量采样粒子, 这些粒子所在状态空间的概率分布即是 $x(t-1)$ 的概率分布^[10-11]。然后由状态方程和系统控制量去改变粒子在空间中的状态, 这样原先采样得到的粒子就成为了预测粒子。在校正阶段中, 对观测方程输入预测值, 然后对其进行噪声处理, 并更新粒子权值, 同时归一化所有粒子的权值。粒子在不断地迭代中^[12-13], 权值与真实值相比越是接近的, 赋予其的权重就会越大, 将会被留到下一次的计算之中, 相反, 与真实值偏差较大的粒子, 就会出现退化现象。

利用 PF 算法进行大身管内高速运动目标速度修复及优化的具体实现步骤如下:

1) 粒子初始化: 设定 $k = 1$, 根据初始的概率密度函数, 抽样得到粒子集, 该粒子集包含有 $N_{\text{粒子}}$ 个粒子, 同时, 对每个粒子赋予初始权重。

2) 预测阶段: 根据系统的状态方程, 计算得到预测值 x_k^i , 计算公式如下

$$x_{k+1}^i = x_k^i, i = 1, 2, \dots, N_{\text{粒子}} \quad (5)$$

3) 更新粒子权值并归一化:

$$\bar{w}_k^i = \frac{\omega_k^i}{\sum_{i=1}^{N_{\text{粒子}}} \omega_k^i} \quad (6)$$

4) 状态估计: 估计值 v_k 的计算公式如下, 对它计算并输出

$$v_k = \sum_{i=1}^{N_{\text{粒子}}} x_k^i \bar{w}_k^i \quad (7)$$

5) 重采样阶段: 对有效粒子进行评估, 如果需重采样就根据粒子重要性执行重采样, 重新产生 $N_{\text{粒子}}$ 个采样粒子, 并赋予新粒子初始权重为 $\frac{1}{N_{\text{粒子}}}$, 主要思想是对权重大的粒子进行复制, 对权重小的粒子进行摒弃。

6) 将 k 设为 $k = k + 1$, 并转到步骤 2) 继续循环迭代计算, 直到运算结束。

按照以上步骤执行即可完成 PF 的运算, 具体实现过程如图 3 所示。

3 实验及结果分析

实验信号来源: 从 50 ms 的实际大口径身管运动目标信号中截取了明显包含有效信号的 14~27 ms 部分。

实验方法: 首先将截取的有效信号进行相应的频谱分

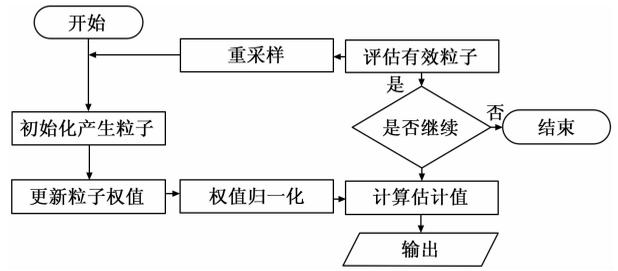


图 3 基于粒子滤波的管状结构内运动速度修复及优化实现流程

析, 选择截止频率为 0.6 MHz 的低通滤波器和截止频率为 50 Hz 的高通滤波器进行滤波处理, 以期去掉高频噪声和低频噪声, 像 50 Hz 的工频噪声, 然后经过小波去噪的预处理, 小波使用的是 db6 类型信号, 对信号进行 6 层分解, 使用最低的三层低频信号减去 3 倍的最高层的高频信号完成小波去噪, 然后通过短时傅里叶变换求出相应的速度曲线, 采用的窗函数是汉宁窗, 窗的长度根据采样率、发射波波长及最大速度值决定, 处理的结果如图 4 所示, 利用上述所提出的阈值判别法剔除异常点如图 5 所示, 然后对信号数据进行三次样条插值处理如图 6 所示, 图 7 是对其局部的放大。最后经过粒子滤波对速度曲线进行优化处理, 如图 8 的示, 图 9 是对粒子滤波结果的局部放大。

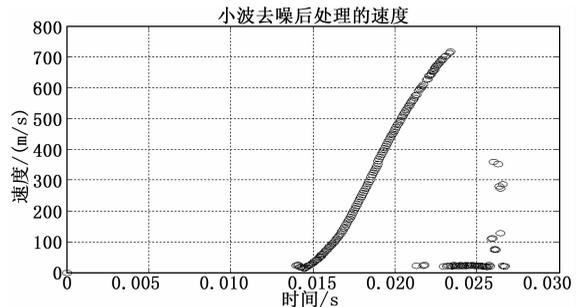


图 4 存在缺失部分的速度曲线

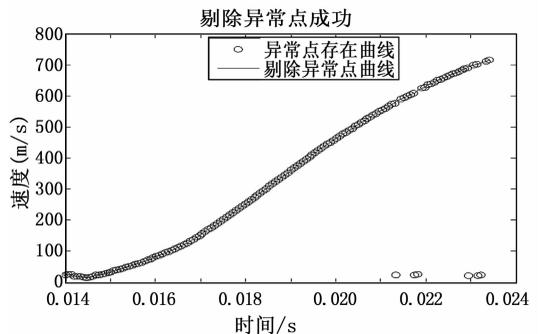


图 5 剔除异常点后的速度曲线

本文系统地阐述了管状结构内目标速度数据的处理整体流程, 图 4 所示的是实际信号通过软件处理得到的存在缺失部分的速度曲线, 可以明显看出在速度曲线的后半段有部分数据点的值明显很小, 与其他数据点相比属于异常

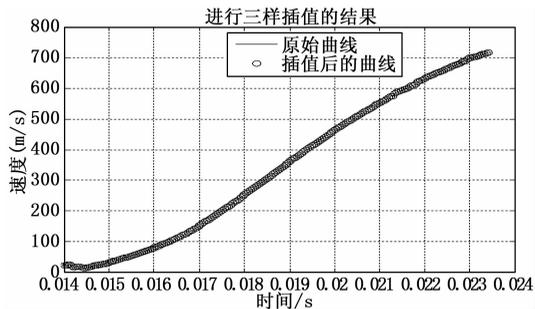


图 6 对局部缺失部分进行三次样条插值

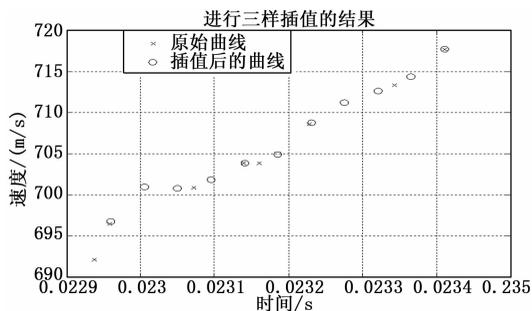


图 7 对局部缺失部分进行粒子滤波

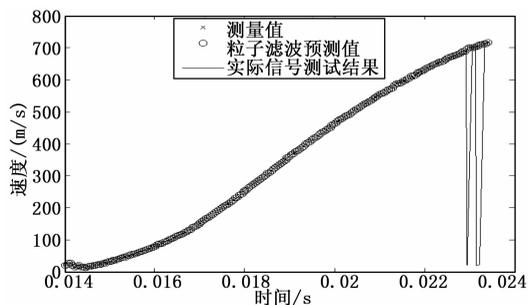


图 8 对速度曲线进行三次样条插值

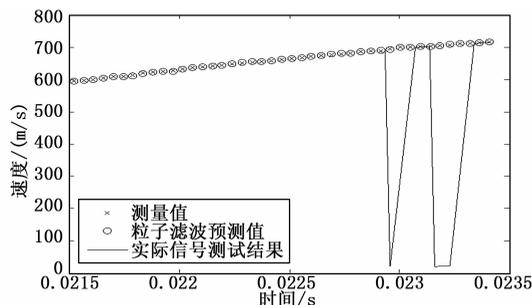


图 9 对速度曲线进行粒子滤波

点, 与真实的值相差太远, 可以说是完全没有了真实速度值的趋势; 图 5 所示的是利用阈值判别法进行剔除异常点前后曲线对比图, 二者比较可以看出剔除异常点成功, 保留了速度曲线原有的趋势特征, 没有产生额外的主观影响; 图 6 所示的是对存对整体速度曲线进行三次样条插值的结果, 处理后的曲线更加平滑, 更加接近真实值; 图 7 所示的是对其局部的放大; 图 8、9 分别所示的是对整体速度曲

线进行粒子滤波的结果和其局部的放大图, 从整体上去验证了方法的可行性, 处理结果良好, 对于完整的速度曲线测试效果显著, 该方法可以用在实际信号处理操作软件的设计上。

速度数据点经过阈值判别法和粒子滤波处理后与原始部分数据的对比如表 1 所示。

表 1 数据对比表

序号	时间/ms	未处理前速度/(m/s)	处理后速度/(m/s)
1	2.28	683.2	682.5
2	2.29	689.1	689.1
3	2.30	692.1	696.2
4	2.31	20.5	700.0
5	2.32	700.9	701.7
6	2.33	703.8	703.6
7	2.34	20.5	705.7
8	2.35	21.2	708.3
9	2.36	713.3	713.4
10	2.37	717.7	717.2

根据上表的数据结果对比, 可以得出所提出方法的可行性, 处理后的结果符合实际速度曲线模型的走势, 并与真实的速度值很接近, 方便测试人员的观察。

4 结论

针对管状结构内运动目标速度信号中的多段缺失问题, 首先对实际采集的数据的预处理过程进行了阐述, 对有效信号截取、去噪及时频分析, 进行了上文提出的基于阈值判别的方法处理, 主要是利用异常点带来的方差变化确定异常点的位置, 从而针对异常点所处的位置进行处理达到修复存在缺失部分的目的; 最后利用粒子滤波对速度曲线进行修复和优化处理。实验信号处理结果表明, 提出的方法能够有效处理大口径身管出口段数据缺失的问题, 在多普勒测速的工程应用方面是一种很好的解决思路, 但对加速段及整个管状结构内运动速度修复及优化, 还需进一步考虑实际的更多因素。

参考文献:

[1] 杨梦玲. 膛内高速运动目标的速度测量技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
 [2] 程 诚, 宋盛义, 关永超, 等. 多普勒雷达测量电磁轨道炮内弹道速度 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26 (4): 83-86.
 [3] 李秀明. 用于目标速度测量的激光多普勒测速技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013.
 [4] 杨 健. 毫米波干涉仪膛内信号处理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
 [5] 王 鉴, 韩 焱, 王黎明, 等. 弹丸在膛内运动的回波信号瞬时频率估计方法研究 [J]. 兵工学报, 2017, 38 (9): 1806-1814.