

基于粒子滤波的速度轨迹补偿^①

高虹, 苏新彦, 姚金杰, 王智伟

(中北大学 山西省信息探测与处理技术重点实验室 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 在膛内测速中, 恢复经过特殊信号处理得到的速度缺失段时, 会受到烟雾、火光和冲击波等因素的干扰, 此干扰会导致实际获取的运动目标在出膛口时刻的多普勒信号能量特别微弱, 速度出现相应的缺失, 降低了测量的精度。针对此干扰, 采用基于粒子滤波(PF)对速度轨迹做补偿的方法, 避开速度缺失段对速度曲线进行采样插值, 首先对插值后缺失段速度进行拟合, 的方法得到缺失段速度模型, 然后再利用此模型对速度进行恢复优化。由于膛口速度是判断目标出膛时刻的关键影响因素, 而速度缺失段通常出现在运动目标出膛口时刻, 因此采用基于粒子滤波(PF)对速度轨迹做补偿的方法对速度缺失段的恢复显得至关重要。

关键词: 膛内测速; 速度缺失; 粒子滤波(PF); 分段插值

Velocity Trajectory Compensation Based on Particle Filter

GAO Hong, SU Xin-Yan, YAO Jin-Jie, WANG Zhi-Wei

(Key Laboratory of Information Detection and Processing Technolog, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In gun bore and recovery through special signal processing of speed missing segments, it is affected by smoke, flame and shock wave and other factors of interference, the interference leads that getting the actual moving target in muzzle moments of the doppler signal energy is particularly weak, speed corresponding losses, it reduces the accuracy of the measurement. According to the interference, using the method based on particle filter (PF) of the trajectory and the velocity compensation, avoids speed missing segments sampling interpolation of velocity curve, and the interpolation of missing segments of speed of fitting method missing interval velocity model is obtained, and then it uses this model to speed recovery optimization. Because the velocity loss section usually appears in the moving target, the muzzle velocity is the key factor to determine the muzzle velocity. Therefore, it is very important for the recovery of the velocity loss.

Key words: muzzle velocity; velocity loss; particle filter (PF); piecewise interpolation

在内弹道测速很多都采用多普勒原理, 例如, 毫米波段的微波干涉测量技术已被普遍采用。采用多普勒原理进行膛内速度测量时, 获取信号后进行处理, 处理过程中, 由于外界干扰因素的存在, 观察可以发现, 此段处于速度快要达到最大值点的前期, 后期速度就趋于平稳, 加速度急剧减小, 速度变化较快, 所以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, 降低了原有的加速度。因此, 需要选择合适的方案, 从局部出发对速度曲线进行分析, 根据速度原有的特

征, 得到它的速度变化趋势。

针对以上问题, 通过研究多普勒信号的时频分析技术, 建立了基于功能灵活的 LabWindows 的软件处理平台, 对速度轨迹进行补偿, 对缺失段的速度曲线进行恢复优化。

1 设计方案

针对以上现象, 论文提出了基于粒子滤波(PF)对速度轨迹做补偿的方案。利用 PF 对信号的速度缺失段进行恢复时需要信号的速度曲线进行建模, 为了提

^① 基金项目:国家自然科学基金科学仪器基础专项(61227003)

收稿时间:2016-06-21;收到修改稿时间:2016-09-27 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005722]

高算法的效率,并不需要对整段速度进行处理,只需获得缺失段速度的模型即可,所以拟采用避开速度缺失段对速度曲线进行采样插值,并对插值后的缺失段速度进行拟合的方法得到缺失段速度的模型,再利用此模型对速度进行恢复优化。

样条插值经常被用于工业设计中曲线进行平滑,而三次样条曲线插值又是应用较为普遍的一种,它是通过一系列采样点根据三次多项式经过插值形成光滑的曲线。在实际问题处理过程中,总是希望将所有获得的采样点用得越多越好,最容易想得到的方法就是将所有的采样点通过直线直接连接起来,但是这样得到的曲线并不平滑,且与原有模型相比误差较大。

2 方案具体实现

2.1 速度轨迹补偿的提出

由于外界干扰因素的存在,比如运动目标出膛口时刻的烟雾、火光、冲击波等,导致实际获取到的多普勒信号经常会伴随着缺失现象,求解得到的速度就会存在缺失段,如图1和图2所示分别为出现异常的多普勒信号和对该多普勒有效信号段的放大。

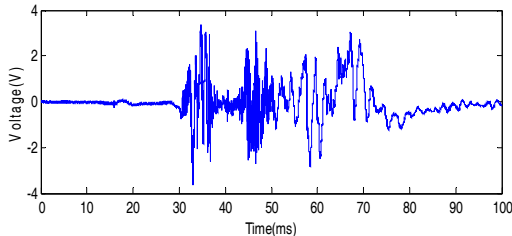


图1 获取的异常多普勒信号

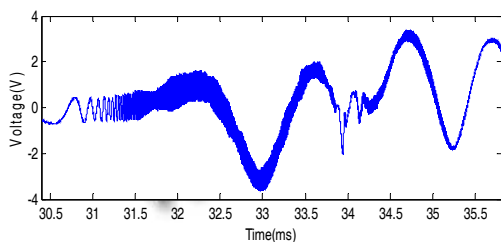


图2 有效信号段的放大

基于上述问题,为了不影响对速度的分析,需要对速度轨迹进行补偿,对缺失段的速度曲线进行恢复优化。

2.2 速度曲线的预处理

正文内容针对以上现象,论文提出了基于粒子滤波(PF)对速度轨迹做补偿的方案。利用PF对信号的速

度缺失段进行恢复时需要信号的速度曲线进行建模,为了提高算法的效率,并不需要对整段速度进行处理,只需获得缺失段速度的模型即可,所以本章采用避开速度缺失段对速度曲线进行采样插值,并对插值后的缺失段速度进行拟合的方法得到缺失段速度的模型,再利用此模型对速度进行恢复优化。

为了降低误差,可以采用分段低次插值的方法,主要思路是将单个高次多项式用多个低次多项式来分段表示,具体实施时先将整个采样段分割成众多小段,然后对每个小段进行低次插值多项式,最后将所有插值多项式拼接成一个整的多项式。它的优点是运算量小、公式简单、稳定性好,且收敛性强,当然也存在着节点处导数不连续、失去了原有函数光滑性的缺点。

样条函数是通过一些依据特定光滑条件分段拼接而成的多项式函数,其中经常使用的是三次样条曲线插值,它的构成是多个三次多项式,处处都有二阶连续的导数。

三次样条曲线插值的计算步骤如下:

设有 $n+1$ 个采样点:

$$(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n) \quad (1)$$

① 计算步长 $h_i = x_{i+1} - x_i (i=0, 1, \dots, n-1)$

② 把首尾两个端点的条件和各采样点代入矩阵方程组;

③ 计算矩阵方程组,获得二次微分值 m_i 。

④ 分别计算三次样条曲线插值的各个系数,即

$$a_i = y_i$$

$$b_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{h_i}{2} m_i - \frac{h_i}{6} (m_{i+1} - m_i)$$

$$c_i = \frac{m_i}{2} \quad (2)$$

$$d_i = \frac{m_{i+1} - m_i}{6h_i}$$

$$(i = 0, 1, \dots, n-1)$$

⑤ 分别在每一个小区间 $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ 中建立方程

$$g_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (3)$$

根据以上步骤即可完成三次样条插值的过程。

在实际的处理过程中,由于三次样条插值会出现首尾两段的振荡问题,为了避免振荡给插值结果带来的误差,对缺失速度段进行采样时可以前后多取一部分,插值完成后再舍去这一部分,以此来降低振荡带来的不稳定,改善信号处理的结果。

2.3 粒子滤波的选取

卡尔曼滤波器(KF)、无味卡尔曼滤波器(UKF)、扩展卡尔曼滤波器(EKF)、PF 等都可以实现对缺失信号的恢复,但是不同的方法使用环境不同,能达到的处理效果也不一样.其中,KF 是最简单的一种,适用于处理线性高斯条件下的信号,但对于非线性非高斯条件下的信号却无法处理;EKF 和 UKF 都是以 KF 为基础针对非线性系统改进而来,可以处理非线性高斯环境下的信号;而 PF 采用随机样本对状态的后验概率做近似,普遍

用在非线性非高斯的环境,它克服了由于选择的重要性分布函数与真实后验概率存在较大差异而引起滤波结果误差较大的不足.各个滤波器在不同的观测方程和状态方程的概率分布特性下的适用范围见表 1 所示.

表 1 各个不同滤波器的适用范围

Table with 4 columns: 观测方程/状态方程, 线性高斯, 线性非高斯, 非线性高斯, 非线性非高斯. Rows list KF, PF, EKF/UKF/PF, and PF for various combinations.

其中 PF 算法实现的一般步骤如图 3 所示.

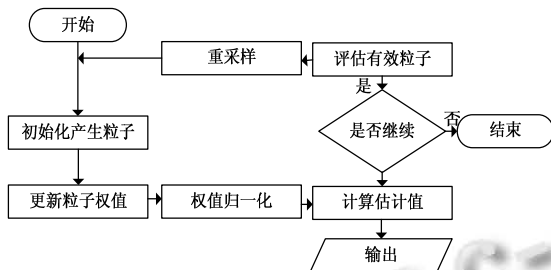


图 3 粒子滤波具体实现流程

3 实验结果

3.1 经典模型的处理

实验中选取的经典模型的状态方程和观测方程的表达式如下:

x_k = 0.5x_{k-1} + 25 * (x_{k-1} / (1 + x_{k-1}^2)) + 8 * cos(1.2(k-1)) + delta_k (4)

y_k = x_k^2 + epsilon_k (5)

在以上表达式中,系统的状态白噪声 delta_k 以及观测白噪声 epsilon_k 的表达式如下所示:

delta_k = sqrt(Q) * rand (6)

epsilon_k = sqrt(Q) * rand (7)

其中,

x_k = 0.5x_{k-1} + 25 * (x_{k-1} / (1 + x_{k-1}^2)) + 8 * cos(1.2(k-1)) + delta_k (8)

y_k = x_k^2 + epsilon_k (9)

取过程噪声协方差 Q 为 10, 测量噪声协方差 R 为 1, x 初始值设为 0.1, 仿真长度为 50, 粒子数为 500, 根据以上参数及方程进行仿真得到处理结果对比图以及误差曲线分别如图 4 和图 5 所示.

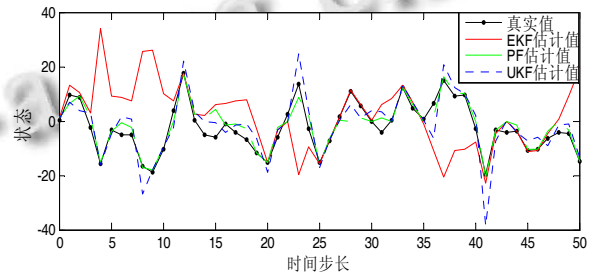


图 4 三种方法对经典模型的处理效果对比图

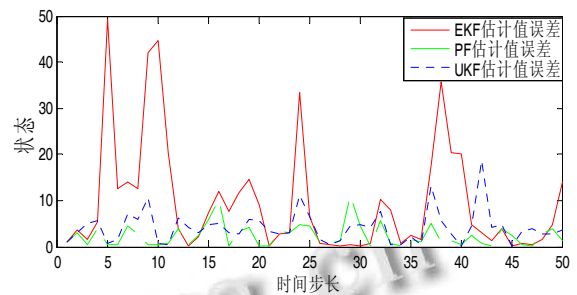


图 5 三种方法对经典模型的处理误差曲线图

由以上各图可知,相同的实验环境下,不论是从拟合程度上还是趋势变化上看,PF 的处理效果都相对较好.相对于 EKF 和 UKF,由于重采样算法的采用,有效粒子数增多,处理结果较稳定,误差较小,对信号的恢复程度高.

3.2 实际信号的实验测试

为了验证提出的方法对实际信号速度的恢复效果,选取了几组在实验中获取到的有缺失的多普勒信号进行处理得到速度,并利用文中的方案对速度做恢复处理,实验的条件见表 2 所示.

表 2 信号获取的实验条件

Table with 4 columns: 采样频率 (20MHz), 采样点数 (1000000), 雷达工作频率 (95GHz), 膛线深度 (2mm), 口径 (30mm), 目标质量 (190g/220g).

药品种	改进药/常规药	身管长度	1660mm
-----	---------	------	--------

在以上实验条件下获取到的多普勒信号以及对多普勒信号处理得到的速度曲线图分别如图 6 和图 7 所示。

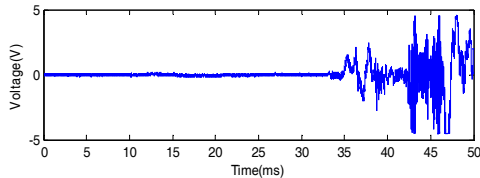


图 6 获取的信号

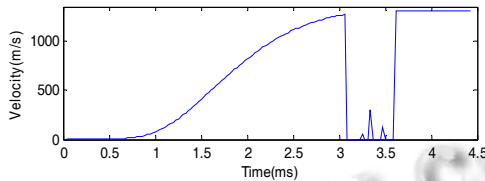


图 7 信号的速度处理结果

对于图 6 所示的速度曲线可知速度的缺失段出现在 3.0858ms 至 3.5861ms, 首先避开速度缺失段并相对速度缺失段左右多取 0.6ms 对速度曲线进行采样插值, 然后选取 2.8356ms 至 3.8363ms 时间段内的速度进行拟合, 采用三阶最小二乘法拟合得到的多项式为:

$$v(k) = 108.31574582514 * t(k)^3 - 1223.29040666680 * t(k)^2 + 4596.74403841918 * t(k) - 4443.59203946271 \quad (10)$$

则系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} v_{k+1} \\ a_{k+1} \\ \bar{a}_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ a_k \\ \bar{a}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 649.89447495084 \end{bmatrix} + \delta_k \quad (11)$$

系统的观测方程与公式(11)相同, 由于此处由实际信号处理得到的速度曲线并没有标准的速度作对比, 无法计算误差, 且该系统与建立的系统属同一类型。

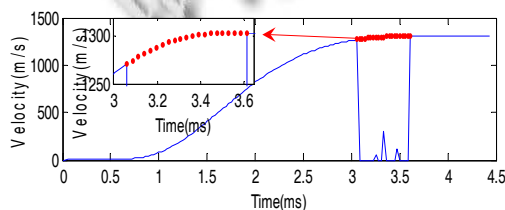


图 8 对改进药速度模型缺失段的恢复效果示意图

系统计算的目标运动的初始时刻为 2.8356ms, 对应的初始速度为 1225.5m/s, 加速度为 0.013836m/s², 加

加速度为 0.10743m/s³, 根据以上参数, 采用论文提出方法对选取的速度段进行处理得到的效果图如图 8 所示。

4 结语

论文首先介绍了对高速运动目标速度缺失轨迹补偿的重要性, 它是影响后续速度测量的关键因素; 然后阐述了对速度缺失段进行恢复所采用的方法, 简单描述了三次样条插值以及最小二乘法多项式拟合的选取原则和实现原理, 并详细阐述了粒子滤波的相关知识; 最后用实验仿真验证了该方法的精度及可实施性, 首先通过一个经典模型对比了卡尔曼的一些改进方法与粒子滤波的处理效果, 并分别采用直接拟合、EKF 以及 PF 方法对模拟速度曲线进行处理, 验证了 PF 的精度. 然后通过对实验中获取的特殊信号的速度进行恢复, 验证了论文提出方法的可实施性, 是对膛内运动目标速度高精度处理方法的一种新的探索。

参考文献

- 1 姚金杰, 安虎, 鲍宏海. 基于 ZigBee 的城市道路井盖安全监测系统设计. 物联网技术, 2014, 11: 81-83.
- 2 王猛, 刘珈池, 王阔瑞, 等. 基于物联网技术的城市小区智能井盖管理系统. 价值工程, 2016, 2: 80-81.
- 3 IEEE 802.15 Working Group for Wireless. Overview of the IEEE 802.15.4 PHY Baseline. IEEE 802.15.4, 2009.
- 4 李亚胜. 基于红外探测的井盖监测系统. 数字技术与应用, 2015, 10: 174-175.
- 5 朱运利. 基于 GPRS 和无线传感器网络的现场监控系统. 仪表技术与传感器, 2008, 12: 46-47, 71.
- 6 Samsung Electronics. \$3C2440A32-bit RISC Microprocessor User Manual. Republic of Korea, 2004: 2. 13.
- 7 Schwarzacher T, Timoney J. VLSI implementation of an adaptive noise canceller. 3rd Int. Symposium on Communication Systems, 2012, (3): 148-150.
- 8 龚沛曾, 陆慰民, 杨志强. VisualBasic6.0 程序设计简明教程. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- 9 杨正洪, 郑齐健. SQL Server 关系数据库系统管理与开发指南. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- 10 黄林. 基于 WSN 的窨井实时巡检技术的研究[硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013.