

基于马尔科夫链的交互残差估计的跟踪波门设计方法

段 毅^{1,2}, 谭贤四¹, 曲智国¹, 王 红¹, 朱源才¹

(1. 空军预警学院, 武汉, 430019; 2. 95174 部队, 武汉, 430000)

摘要 跟踪波门通常基于残差估计进行设计, 但传统残差估计法在目标机动状态未知时的预测精度较差。针对这个问题, 在分析 2 种现有残差估计法的适用环境基础上, 提出了一种基于马尔科夫链的交互残差估计法: 该方法首先分别利用现有 2 种估计法对下一时刻残差值进行预测, 定义并计算滑窗内 2 种方法的预测误差, 并根据预测误差的似然函数计算对应似然值; 然后, 基于服从已知概率的马尔科夫链的转移矩阵, 采用似然值求解各方法所占权重; 最后, 通过加权求和得出下一时刻残差预测值。仿真实验表明, 利用文中算法得出的残差预测值在目标运动状态未知的情况下精度较高, 据此设计的跟踪波门性能更优。

关键词 跟踪波门; 机动目标; 杂波环境; 残差估计; 马尔科夫链

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.014

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)06-0083-06

A Tracking Gate Design Method of the Interaction Estimation Based on Markov Chain

DUAN Yi^{1,2}, TAN Xiansi¹, QU Zhiguo¹, WANG Hong¹, ZHU Yuancai¹

(1. Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China; 2. Unit 95174, Wuhan 430000, China)

Abstract: Design of gate tracking is usually made based on residual estimation, but the traditional residual estimation method is comparatively poor in precision under condition of the unknown target state. For this problem, this paper analyzes the application environments of two kinds of the existing residual estimation methods, and proposes an interactive estimation algorithm based on Markov chain. Firstly, the existing two kinds of estimation methods are used to predict respectively the residual value of next time. The prediction error is defined and calculated according to the predicted values. Then, the likelihood value is used to calculate the weight of each methods based on the transition matrix of Markov chain. Finally, the residual value of next time is sought out through weight summation. The simulation experiments show that the prediction accuracy obtained by this method is higher than that by the traditional methods under condition of the unknown target state.

Key words: gate tracking; high maneuvering target; clutter environment; residual estimate; Markov chain

杂波环境下的机动目标跟踪是目标跟踪领域的重点和难点问题之一, 其关键在于解决量测来源和

对目标运动状态的估计^[1-2], 对于雷达而言, 首先要预测下一次量测点迹可能出现的区域, 即跟踪波门

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(61401504); 中国博士后科学基金(2014M562562)

作者简介: 段 毅(1989—), 男, 山西运城人, 工程师, 硕士生, 主要从事相控阵雷达资源管理问题研究. E-mail: 1074146275@qq.com

引用格式: 段毅, 谭贤四, 曲智国, 等. 基于马尔科夫链的交互残差估计的跟踪波门设计方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 83-88. DUAN Yi, TAN Xiansi, QU Zhiguo, et al. A Tracking Gate Design Method of the Interaction Estimation Based on Markov Chain [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 83-88.

的大小^[3]。当目标发生机动时,由于跟踪算法的参数设置难以与目标实际运动状态完全匹配,因此预测结果与目标运动状态存在较大偏差^[4],此时如果采用较小的跟踪波门,目标的真实量测有可能落在跟踪波门之外,引起“失跟”现象^[5-6]。扩大跟踪波门虽然在一定程度上缓解了目标机动时的失跟现象,但过大的跟踪波门在浪费雷达能量的同时也大大增加了杂波进入概率,引起“误跟”现象^[7-8];可见,为在降低失跟概率的同时减小杂波进入概率,必须对跟踪波门大小实施有效控制^[9]。

由于跟踪波门大小计算与残差预测值密切相关^[10-11],因此残差预测对确定波门大小至关重要;文献^[12]利用 IMM-PDA 算法计算跟踪波门,但若目标在滤波器检测到无有效量测点迹前已经开始机动,则失跟率仍然较高;文献^[13]通过修正新息协方差矩阵自适应调整跟踪波门大小,对于杂波环境下机动目标跟踪有较好效果,但该方法要对目标最大机动水平做出假设,需要较多先验信息;文献^[14]在上文基础上利用改进 IMM-PDA 算法,同时调整波门中心与波门大小,效果较上文更优,但该方法逐步扩大跟踪波门,存在时效性不强的问题;文献^[15]利用滑窗内残差平方和的均值预测下一时刻残差大小,文献^[16]利用滑窗内残差三阶累计量的均值作为下一时刻残差预测值,再在预测值基础上进行跟踪波门计算,利用均值法估算能较好的抑制噪声的对残差的影响,但在目标机动时预测精度不高。

现有跟踪波门设计中残差估计通常基于均值法和插值法。均值法能较好地抑制噪声影响,但对复杂变化函数拟合精度较差,因此仅适用于无机动控制信号输入情况;插值法能较好地拟合复杂函数变化规律^[17],描述目标机动时残差变化,但预测结果受噪声影响较大,在目标无机动时估值精度低于均值法,因此仅适用于目标机动情况。可见,利用均值法与插值法进行残差估计均有一定局限性,在目标机动状态未知情况下难以进行有效预测;针对这个问题,本文提出一种基于马尔科夫链^[18]的交互残差估计法。

1 自适应跟踪波门合理性分析

根据是否存在控制信号输入将跟踪波门变化分为如下 2 种情况,其中图 1 表示无控制信号输入时跟踪波门变化情况,图 2 表示存在控制信号输入时跟踪波门变化情况。图中 $\hat{X}(t|t-1)$ 表示状态一步预测; $Z(t)$ 表示 t 时刻目标量测位置。

由图可知,假设在 $k-2$ 时刻雷达稳定跟踪目标;当无控制信号输入时,由于噪声的存在,目标量

测点迹 $Z(t)$ 有较大概率落入预测值 $\hat{X}(t|t-1)$ 周围一较小区域内,此时可以采用较小的跟踪波门以减小降低杂波进入概率;当存在控制信号输入时真实航迹会逐渐偏离预测航迹,经过若干次跟踪后偏离距离过大将导致目标真实位置位于跟踪波门外,引起“失跟”现象,因此必须扩大波门以保证真实航迹落入波门内。

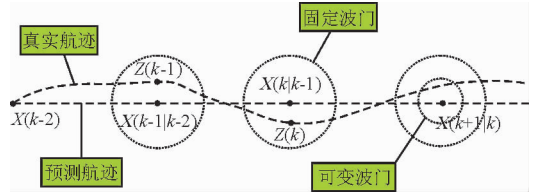


图 1 无控制信号输入时波门变化示意图

Fig. 1 Tracking gate change when no control signal input

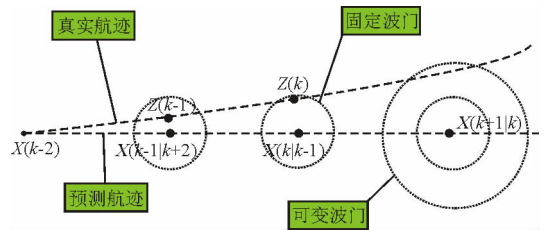


图 2 存在控制信号输入时波门变化示意图

Fig. 2 Tracking gate change when control signal input

2 基于残差估计的自适应波门设计

2.1 自适应波门设计方法

跟踪波门体积大小为:

$$V(k+1) = c_n \gamma^{\frac{n}{2}} \sqrt{|\mathbf{S}(k+1)|} \quad (1)$$

式中: n 为量测维度; c_n 是该维度下单位球体积,均为一定值; $\mathbf{S}(k+1)$ 为新息协方差矩阵,在滤波器中求得; γ 为跟踪波门门限参数。为保证稳定跟踪,必须使得真实量测 $Z(k+1)$ 位于跟踪波门内,同时要使得跟踪波门内杂波点数尽量少, γ 取值应尽量小;因此门限参数 γ 有:

$$\gamma = \hat{\mathbf{V}}^T(k+1) \mathbf{S}^{-1}(k+1) \hat{\mathbf{V}}(k+1) \quad (2)$$

式中: $\hat{\mathbf{V}}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻残差预测值。由式(1)与式(2)可知,要确定 $k+1$ 时刻跟踪波门体积 $V(k+1)$,关键是求得该时刻残差预测值 $\hat{\mathbf{V}}(k+1)$ 。

要计算 $\hat{\mathbf{V}}(k+1)$,可利用前 N 次跟踪过程中残差值通过外推的方法进行预测,其中 N 为滑窗长度。因此需要先对滑窗内残差变化规律进行分析。

假设目标在 t 时刻稳定跟踪某批目标,则 $t+1$ 时刻目标残差为:

$$\mathbf{V}(t+1) = \mathbf{Z}(t+1) - \hat{\mathbf{Z}}(t+1|t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{Z}(t+1)$ 为目标量测值; $\hat{\mathbf{Z}}(t+1|t)$ 为量测预测值^[19],带入可得 $t+1$ 时刻目标残差为:

$$\mathbf{V}(t+1) = \mathbf{HF}(T)(\mathbf{X}(t) - \hat{\mathbf{X}}(t)) + \mathbf{G}(T)\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}\mathbf{v}(t) + \mathbf{w}(t+1) \quad (4)$$

依次类推,求出 $\mathbf{V}(t+2)$ 、 $\mathbf{V}(t+3)$...

当 $\mathbf{u}(t) = \mathbf{0}$ 时,分析 $\mathbf{V}(t+1)$ 、 $\mathbf{V}(t+2)$ 、...可得无控制信号输入时残差变化规律,即:当雷达稳定跟踪目标且无控制信号输入时,残差稳定在零值附近。

当 $\mathbf{u}(t) \neq \mathbf{0}$ 时,同上可知存在控制信号时残差变化规律为:在雷达稳定跟踪目标情况下输入控制信号时,残差均值的绝对值迅速增大,之后由于滤波器具有鲁棒性残差均值绝对值迅速减小,经过若干次震荡后再次稳定在零值附近。

针对上述2种情况本文分别给对均值法、拉格朗日插值法进行介绍、分析其适应环境;并在次基础上给出了基于马尔科夫链的交互残差估计法计算 $\hat{\mathbf{V}}(k+1)$ 。

2.2 均值法

假设前 N 次跟踪时残差为 $\{V(x_i)\}$;其中 $i \in [1, 2, \dots, N]$, $x_1 = k - N + 1$, $x_2 = k - N + 2$, ..., $x_N = k$, 记 $x = k + 1$ 。

利用均值法计算第 $k+1$ 次跟踪时残差期望预测值为:

$$\hat{\mathbf{V}}^1(x) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} V(x_i) \quad (5)$$

第 $k+1$ 次跟踪时残差分布预测 $\hat{\mathbf{V}}^1(x) \sim N(\hat{\mathbf{V}}^1(x), \mathbf{S}(x))$;其中 $\mathbf{S}(x)$ 为新息协方差^[20]。通过给定置信区间 α 并查表可求出 $k+1$ 次跟踪时残差预测值 $\hat{\mathbf{V}}^1$ 。

利用均值法进行残差估计中由于 $\sum_{i=1}^N \frac{1}{N^2} \leq 1$, 因此能较好地抑制噪声影响;但均值法对于复杂函数拟合程度较低,在残差变化过大时预测精度较低,因此仅适用于无控制信号输入的情况。

2.3 拉格朗日插值法

利用拉格朗日插值法(以下简称插值法)估计第 k 次跟踪时残差期望为:

$$\hat{\mathbf{V}}^2(x) = \sum_{j=1}^N \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \right) \mathbf{V}(x_j) \quad (6)$$

同理可求 $\hat{\mathbf{V}}^2$ 。

由于插值法能够拟合出复杂变化的函数曲线,且当存在控制信号输入时残差均值变化类似于阻尼振荡函数,因此此时利用插值法能得到较为准确的预测结果;但由于滑窗内残差 $\mathbf{V}(x_i)$ 含有噪声,且 $\sum_{j=1}^N \left(\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \right)^2 \geq 1$, 因此利用插值法估值过程中存在“噪声累积”的问题,即将滑窗内前若干次量

测噪声影响“累积”至下一时刻预测值中,使得预测受噪声影响较大,因此插值法适用于 $\mathbf{u}(t) \gg \mathbf{w}(t) + \mathbf{v}(t)$, 即控制信号远大于噪声影响的情况。

2.4 基于马尔科夫链的交互残差估计法

上述2种估值方法能够分别适用于跟踪2种不同运动状态的目标,而在实际情况下目标运动状态未知,无法具体决定运用哪种方法。但在跟踪过程中可通过运动模型描述目标运动状态^[21],不同模型间可通过基于概率已知的马尔科夫链进行切换^[22-25],因此本文提出基于马尔科夫链的残差交互预测法(简称交互法)。

交互法利用上述2种残差估计方法分别对下一时刻残差值进行预测,且2种方法间服从已知概率的马尔科夫链,根据滑窗内各估值法预测误差的似然函数确定方法权重,通过加权求出下一时刻残差预测值,可分为预测误差计算、似然值计算、方法概率更新、估值输出等4个步骤。

Step1 预测误差计算。 t 时刻方法 m 的预测误差为:

$$\Delta \mathbf{V}^m(t) = \mathbf{V}(t) - \hat{\mathbf{V}}^m(t) \quad (7)$$

此时方法 m 的误差方差为:

$$\sigma(\mathbf{V}^m(x)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta \mathbf{V}^m(x_i) - E(\Delta \mathbf{V}^m(x_i)))^2 \quad (8)$$

Step2 似然值计算。利用预测误差的似然函数计算选择方法 m 的似然值为:

$$\Lambda^m = (2\pi \mathbf{E}\sigma(\mathbf{V}^m(x)))^{-1/2} \cdot \exp(-2^{-1} \Delta \bar{\mathbf{V}}^m \mathbf{E}\sigma(\mathbf{V}^m(x))^{-1} \Delta \bar{\mathbf{V}}^m) \quad (9)$$

式中: \mathbf{E} 是单位阵。

Step3 方法概率更新。方法 m 的概率更新为:

$$\mathbf{u}^m(k) = \mathbf{C}^{-1} \Lambda^m(k) \bar{\mathbf{C}}(k) \quad (10)$$

式中: $\mathbf{C} = \sum_{i=1}^r \Lambda^m(k) \bar{\mathbf{C}}_i$, $\bar{\mathbf{C}}(k) = \sum_{i=1}^r p_i^m \mathbf{u}^m(k-1)$, p_i^m 为状态转移矩阵中元素。

Step4 估值输出。利用交互方法估计残差期望值为:

$$\hat{\mathbf{V}}^0(k) = \sum_{m=1}^r \mathbf{u}^m(k) \hat{\mathbf{V}}^m(k) \quad (11)$$

同理可求 $\hat{\mathbf{V}}^0$ 。

3 仿真分析

3.1 跟踪波门评价指标

为量化比较基于3种残差估计法设计得出波门的性能,采用如下评价指标:

1) 失跟率。失跟率为目标落入跟踪波门内的点数与总跟踪点数的比值,即:

$$R_L = \frac{\sum_{t=1}^N L(t)}{N} \times 100\% \quad (12)$$

式中: N 为总跟踪点数。

$$L(t) = \begin{cases} 0, & \mathbf{V}^T(t)\mathbf{S}^{-1}(t)\mathbf{V}(t) > \gamma \\ 1, & \mathbf{V}^T(t)\mathbf{S}^{-1}(t)\mathbf{V}(t) \leq \gamma \end{cases} \quad (13)$$

由上式可知失跟率 R_L 有: ① $R_L \in [0\%, 100\%]$; ② R_L 越小, 跟踪波门性能越佳。

2) 平均量测个数。是指在有效跟踪前提下, 落入跟踪波门内回波点迹个数, 包括目标回波与附近杂波。

$$N_A = \frac{\left(\sum_{t=1}^T N(t)\right)}{(1-R_L)T} \quad (14)$$

式中: $N(t) = \begin{cases} 0, & L(t)=0 \\ \text{numal}(\mathbf{Z}_G(k+1)), & L(t)=1 \end{cases}$, $\text{numal}(A)$ 表示集合 A 中元素个数。

跟踪波门内有效量测集合 $\mathbf{Z}_G(k+1)$ 为:

$$\mathbf{Z}_G(k+1) =$$

$$\{\mathbf{Z}_i(k+1) \mid \mathbf{V}_i^T(k+1)\mathbf{S}^{-1}(k+1)\mathbf{V}_i(k+1) \leq \gamma\} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{Z}_i(k+1)$ 为第 $k+1$ 次跟踪时第 i 个量测向量, 其中包括目标回波与附近杂波; $\mathbf{V}_i(k+1)$ 为该向量所对应的残差。

由式(14)可知平均量测数 N_A 有: ① $N_A \geq 1$ 、② N_A 越小, 跟踪波门性能越佳。

3.2 目标参数设置

假设 $t=0$ s 时刻雷达在 5 km 高空捕获某批速度为 1 Ma 的目标, 该批目标在 $t=30$ s 时刻获得 $x=20 \text{ m/s}^2$ 水平加速度, 在 $t=70$ s 时恢复匀速飞

行, 此时目标速度为 $v=1140 \text{ m/s}$, 飞行航迹与速度变化见图 3。

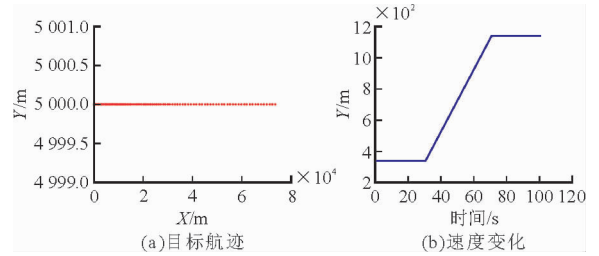


图3 目标参数设置

Fig. 3 Target parameter setting

设雷达量测噪声 20 m, 采样周期 1 s, 利用卡尔曼滤波、CA 运动模型^[24]对该批目标跟踪, 由式(3)计算得该批目标残差(以 X 方向为例)见图 4。

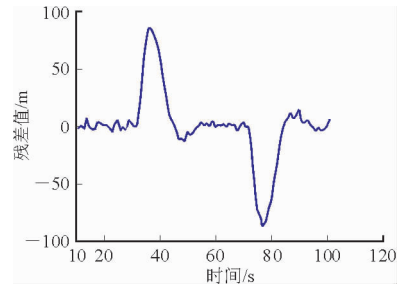


图4 真实残差值

Fig. 4 The true residual value

3.3 算法性能比较

分别利用文中 3 种方法对残差进行估值, 取滑窗

长度 $N=5$, 交互法中概率转移矩阵 $\mathbf{p} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$,

初始概率 $\mathbf{u} = [0.8 \ 0.2]$, 估值结果见图 5。

由式(7)得到 3 种估值方法预测误差见图 6。

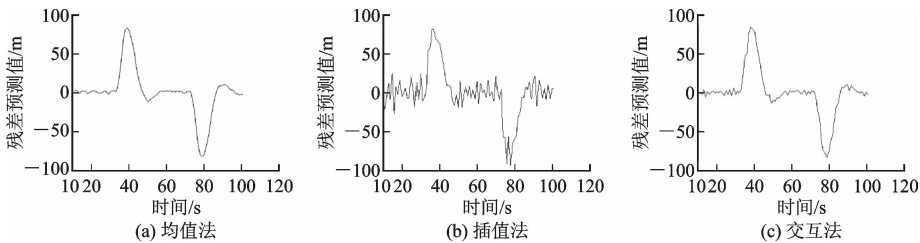


图5 残差期望预测值

Fig. 5 Residual predictive value

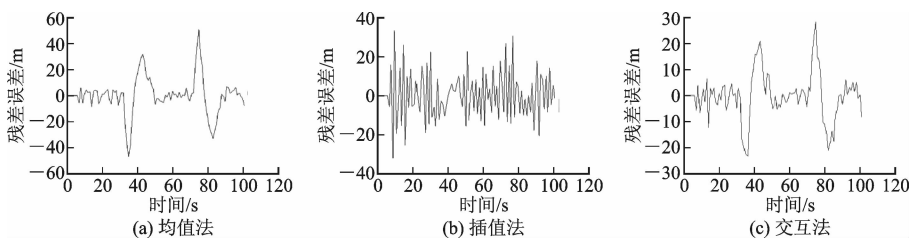


图6 预测误差值

Fig. 6 Prediction error

将整个跟踪过程按时长 20 s 划分为 5 个时间段(其中 0~10 s 内目标未稳定跟踪不做考虑),分别计算 3 种估值方法的预测误差,计算方法为:

$$\bar{V}^m(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\Delta V^m(x_i)\|, \text{ 此处 } N \text{ 为该段时间内跟踪点数; 预测误差见表 1.}$$

表 1 预测误差值

Tab. 1 Prediction error

时间段/s	11~30	31~50	51~70	71~90	91~100	10~100
均值法	7.227 3	506.670 6	9.943 4	579.515 7	10.349 7	246.340 4
插值法	65.056 5	79.591 0	54.365 2	68.273 0	67.429 8	66.889 0
交互法	10.758 1	83.252 1	11.411 3	77.523 2	18.227 9	42.679 6

由表 1 可以看出,均值法在无控制信号输入时(11~30 s、51~70 s、91~100 s)预测误差值较小,但当存在控制信号输入时(31~50 s、71~90 s)预测误差显著上升;插值法在无控制信号输入时由于“噪声累计”现象,预测误差大于均值法,但存在控制信号输入时能够较为准确的拟合出残差变化趋势,估值误差明显小于均值法。

交互法能够自适应在 2 种估计法间进行选择,且有较大几率选择“较优”估计方法;因此综合来看(11~100 s)交互法估值精度更高,更适用于目标运动状态未知的环境。

3.4 跟踪波门性能分析

取置信区间 $\alpha=95\%$,查表求出残差预测值 \hat{V} ,设杂波环境为均匀分布(10^{-6} 个/ m^2),通过 1 000 次蒙特卡洛仿真实验分别求出失跟率与平均量测个数,见图 7。

降低平均量测个数,但在目标机动时失跟率显著上升;交互法综合了两者优点,对失跟率与平均量测个数均能较好控制,综合考虑性能更优。

4 结语

本文针对跟踪波门设计中残差估计的问题,提出了一种基于马尔科夫链的交互残差估计法,该方法能够自适应的在多种残差估计方法之间切换,使得目标运动状态未知情况下残差准确度更高,在此基础上求出的跟踪波门在综合性能更优,验证了算法的有效性。

但本文所提出的交互法仅利用 2 种单一估计法,此外还存在有利用二次均值、三次均值、牛顿插值、Hermite 插值、三次样条插值^[26]等残差估计法,这些方法如何计算以及适用何种环境有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] KIRUBARAJAN T, BAR-SHALOM Y. Probabilistic Data Association Techniques for Target Tracking in Cluter [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92 (3): 536-557.
- [2] JIANG X, HARISHAN K, Tharmarasa R, et al. Integrated Track Initialization and Maintenance In-heavy Clutter Using Probabilistic Data Association [J]. Signal Processing, 2014, 94(7): 241-250.
- [3] 董国,岳三创. 航迹预处理中相关波门研究 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(13): 19-21.
DONG G, YUE S C. Study of Correlative Wave Gate in Flight Path Preliminary Treatment [J]. Modern Electronics Techique, 2012, 35(13): 19-21. (in Chinese)
- [4] MAZOR E, AVERBUCH A, BAR-SHALOM Y, et al. Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: a Survey [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34 (1): 103-123.
- [5] LIU X Y, WANG K K, LI D L, et al. A Two-Stage Gating Algorithm for Joint Probability Data Association Filter [C]// International Conference on Signal Processing. Beijing, China, 2010: 381-384;
- [6] WON Y J, ROBERTS S J. Robust Measurement

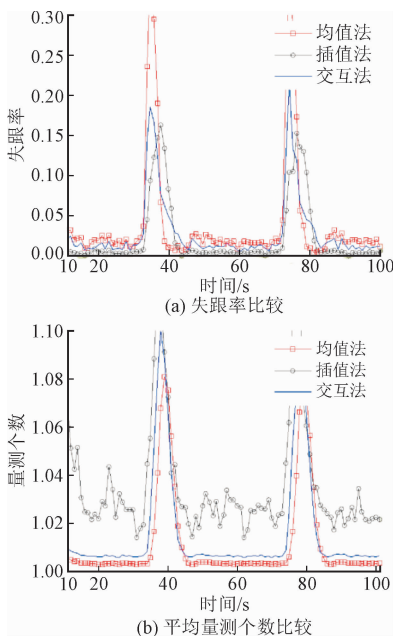


图 7 波门性能比较

Fig. 7 Gating track performance

由图 7 可知,3 种残差估计法中插值法进行对失跟率控制较好,但是由于“噪声累计”的存在,波门大小明显超过另外 2 种方法,平均量测个数明显增多;均值法结论与之相反,能较好的控制波门大小,

- Validation in Target Tracking Using Geometric Structure [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 17(5): 493-496.
- [7] BAR-SHALOM Y, LI X R. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques [C]// Storrs, CT: YBS Publishing, 1995.
- [8] WANG M H, WANQ, YOUZS. A Gate Sizeestimation Algorithm for Data Association Filetrs [J]. Science in china Series(F Inormation Science), 2008, 51(4): 425-432.
- [9] MUSICKI D, MORELANDE M R. Gate Volume Estimation for Target Tracking [C]// Proceeding of the 7th International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 2004: 455-462.
- [10] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜, 等. 多源信息融合 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2010.
HAN C S, ZHU H Y, DUAN Z S, et al. Multi-Source Information Fusion [M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
ZHOU H R, JING Z L, WANG P D. Maneuvering Target Tracking [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [12] WANG X Z, CHALLA S, EVANS R. Gating Techniques for Maneuvering Target Tracking in Clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 1087-1097. (in Chinese)
- [13] 程婷, 何子述, 李亚星. 一种具有自适应关联门的杂波中机动目标跟踪算法 [J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 865-870.
CHENG T, HE Z S, LI Y X. A Maneuvering Target Tracking Algorithm with Adaptive Association Gate in Clutters [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(4): 865870. (in Chinese)
- [14] 靳标, 纠博, 苏涛, 等. 一种用于杂波中机动目标跟踪的自适应关联波门设计方法 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 35-40.
JIN B, JIU B, SU T, et al. A Method to Design Adaptive Correlating Gate for Maneueing Target Tracking in Clutter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10);35-40. (in Chinese)
- [15] 何金新, 邱杰, 王国宏. 相控阵雷达事件调度中的时间窗研究 [J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(7): 80-86.
HE J X, QIU J, WANG G H. Study on Time Window in Multifunction Phased Array Radar Task Scheduling [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(7): 80-86. (in Chinese)
- [16] 蓝瑶, 吕泽均. 基于残差三阶累积量的跟踪门新方法 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2013, 50(7): 760-764.
LAN Y, LV Z J, A Nove Tracking Aate Algorithm on Residual Thrird-Order Cumulants [J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2013, 50(7): 760-764. (in Chinese)
- [17] 熊洪允, 曾绍标, 毛云英. 应用数学基础[M]. 4版. 天津: 天津大学出版社, 2004.
XING H Y, ZENG S B, MAO Y Y. Fundamentals of Applied Mathematics [M]. 4th Ed. Tianjing Tianjin University Press, 2004. (in Chinese)
- [18] FREDERICK S H, GERALD J L. 运筹学导论 [M]. 8版. 胡运权, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
FREDERICK S H, GERALD J L. Introduction to Operations Research [M]. 8th Ed. HUN Y Q, Translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [19] 何友, 修建娟, 关欣. 雷达数据处理及应用[M]. 3版, 北京: 电子工业出版社, 2013.
HE Y, XIU J J, GUAN X. Radar Data Processing with Applications [M]. 3rd Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
- [20] Bassem R M. 雷达系统分析与设计(MATLAB版) [M]. 2版. 陈志杰, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Bassem R M. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB [M]. 2th Ed. CHEN J, et al. Translated. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008. (in Chinese)
- [21] 金学波. Kalman 滤波器理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
JING X B. Theory and Practice of Kalman Filtering [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [22] 程婷, 何子述, 李会勇. 采用多速率多模型交互实现机动目标的全速率跟踪 [J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2315-2322.
CHENG T, HE Z S, LI H Y. Full-Rate Tracking of a Maneuvering Target Using Multi-Rate Interacting Multiple Model Algorithm [J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 34(12): 2315-2322. (in Chinese)
- [23] 冯济周. 基于交互多模型的目标跟踪算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
HE J Z. Research of Target Tracking Algorithm Based on Interacting Multiple Mode [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [24] 邵静, 王利超, 刘新平. 灰色马尔科夫模型及其应用 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2009, 22(3): 370-374.
SHAO J, WANG L Q, LIU X P. The Gray-Markov Prediction Model and Its Application [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2009, 22(3): 370-374. (in Chinese)
- [25] 胡婷婷, 贺兴时, 杨新社. 基于萤火虫算法的 Markov 模型及收敛性分析 [J]. 纺织高校基础科学学报, 2009, 22(3): 370-374.
HU T T, HE X S, YANG X S. Markov Model and Convergence Analysis Based on Firefly Algorithm [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2014, 21(4): 496-501. (in Chinese)
- [26] 吕同富, 康兆敏, 方秀男. 数值计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
LYU T F, KANG Z M, FANG X N. Numerical Calculation Method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)