多级弹道目标主动段机动检测自适应跟踪算法

梁小虎 朱武宣 郭军海 赵 华

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京, 100094)

摘 要: 目前用于多级弹道目标主动段跟踪的"当前"统计模型无迹卡尔曼滤波算法在级间分离等强机动段会出现滤波误差大幅突跳的问题. 通过理论分析和仿真指出滤波器参数不能随目标机动强弱自适应调整是根本原因. 提出了一种基于滤波残差均值延迟相关的机动检测统计量,给出了其概率分布. 仿真结果表明它比传统检测方法有效提高了检测性能. 在此基础上给出了一种实时调整"当前"统计模型中机动频率的自适应跟踪算法. 仿真结果表明,新算法能有效抑制误差突跳,加快滤波收敛速度,将主动段滤波精度提高一倍以上.

关 键 词: 多级弹道目标; 主动段跟踪; 机动检测; 自适应滤波; "当前"统计模型

中图分类号: TN 98

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)12-1682-05

Adaptive tracking algorithm based on maneuver detection for multi-stage ballistic target boost phase

Liang Xiaohu Zhu Wuxuan Guo Junhai Zhao Hua

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The filtering error will jump largely in strong maneuvering periods for multi-stage ballistic target boost phase tracking using unscented Kalman filter(UKF) based on current statistic(CS) model. Theory and simulation analyses pointed out that the key reason was the filter parameters can't be adjusted with the target maneuver strength. A new maneuver detection test statistic based on delay correlation of filtering residuals' mean was proposed, and its probability distribution was analyzed. Simulation results show that it efficiently improves the maneuver detection performance than traditional methods. Then an adaptive tracking algorithm adjusting the CS model maneuvering frequency in real time was established. The simulation results illustrate that the new algorithm can effectively restrain the error jump, speed up the filtering convergence and improve the tracking accuracy by more than 100 percent.

Key words: multi-stage ballistic target; boost phase tracking; maneuver detection; adaptive filtering; current statistic model

目标跟踪是指实时地从测量设备所获取的含有噪声的测量数据中估计目标的位置、速度等运动状态. 在测量数据一定的情况下,跟踪算法的性能主要取决于目标运动模型及选用的滤波方法.

对于多级弹道目标的主动段跟踪,目前得到实际应用的算法是基于当前统计(CS, Current Statistic)模型的无迹卡尔曼滤波(UKF, Unscented Kalman Filter)[1],简记为 CS-UKF. 这是由于主动段的受力情况非常复杂,包括推力、控制力、空气动力、引力以及由地球自转引起的哥氏力和牵连惯性力等[2],而且还包括级间分离、头体分离等强机动段落. 因此,对跟踪系统而言,准确的动力学模型是未知的,只能采用近似的运动学模型描述. CS 模型关心目标每一个"当前"时刻的机动,适合于不断机动的目标,同时参数设置简单、状态噪声阵有严格的解析形式[3],是比较好用的机动

收稿日期: 2013-01-22; **网络出版时间**: 2013-06-09 10:16

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130609.1016.003.html

作者简介: 梁小虎(1986-),男,陕西汉中人,硕士生, liangxiaohu_2006@163.com.

模型. 另一方面,由于测量数据是目标运动状态的非线性函数,目标跟踪属于非线性滤波问题. 非线性滤波方法主要有扩展卡尔曼滤波(EKF, Extended Kalman Filter)、UKF 和粒子滤波(PF, Particle Filter). 从跟踪精度、计算复杂度和滤波稳定性等三方面考虑,UKF 性能最优[4-5].

相较靶场传统的实时处理算法,CS-UKF 具有更高的位置、速度估计精度和更好的抗不完全测量性. 但是,对多级弹道目标,CS-UKF 在级间分离、头体分离等强机动段的滤波误差会发生大幅度突跳,且突跳后需要较长时间才能重新收敛. 本文分析了原算法误差突跳的原因,提出了一种基于新型机动变化检测的自适应 CS-UKF 算法,有效解决了这一问题.

1　问题分析

1.1　CS-UKF 算法分析

CS 模型的具体形式以及 UKF 的具体算法流程参阅文献[1],本文不再赘述. 在三维直角坐标系中,CS 模型的重要参数包括机动频率 α 和 3 个方向的极限加速度 $a_{\max}, a_{-\max}$. 它们决定着对滤波性能至关重要的状态噪声协方差阵 $\boldsymbol{Q}_k$ 的取值.

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{Q}_k &= \mathrm{diag}(\boldsymbol{Q}_x, \boldsymbol{Q}_y, \boldsymbol{Q}_z)\\ \boldsymbol{Q}_i &= \sigma_i^2 \boldsymbol{Q}_0 \quad i = x, y, z\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

$$\sigma_i^2 = \begin{cases}\dfrac{4-\pi}{\pi} 2\alpha (a_{\max i} - \bar{\ddot{i}}_k)^2, & \bar{\ddot{i}}_k > 0\\ \dfrac{4-\pi}{\pi} 2\alpha (a_{-\max i} + \bar{\ddot{i}}_k)^2, & \bar{\ddot{i}}_k < 0\end{cases}$$

其中 $\boldsymbol{Q}_0$ 是关于 α 与采样周期 T 的时不变矩阵.

$\boldsymbol{Q}_k$ 表征模型的准确程度,其值越小表明模型越准确. 在 CS 模型的实际应用中,一般采用加速度均值自适应算法[3],此时它在状态预测时等效于匀加速模型. $\boldsymbol{Q}_k$ 越小,认为目标运动越接近匀加速运动;$\boldsymbol{Q}_k$ 越大,认为目标加速度变化范围越大,越偏离匀加速运动. 当各方向极限加速度预先设定后,由于加速度估计值是滤波器输出,不能人为改变,影响 $\boldsymbol{Q}_k$ 的滤波器参数只有机动频率 α. 由式(1)可知,α 越大,$\boldsymbol{Q}_k$ 越大,适用于目标强机动的情况;反之,α 越小,$\boldsymbol{Q}_k$ 越小,适用于目标弱机动的情况.

通常预先设定好滤波器参数并在滤波过程中保持不变. 那么若 α 取的较小,将使滤波结果在强机动时错误地依赖匀加速模型的预测值,导致滤波误差增大甚至滤波发散;若 α 取的较大,虽然可以适应目标的强机动,但在弱机动时模型的约束能力降低,牺牲了滤波精度. 因此,如果滤波过程中采用固定的 α,机动适应性与滤波精度是一对无法调和的矛盾. 这就是 CS-UKF 用于多级弹道目标主动段跟踪时在强机动段落发生误差大幅突跳的根本原因.

1.2　仿真分析

对某型三级弹道目标进行 CS-UKF 滤波仿真. 测量设备为一台脉冲雷达,测元包括距离 R、方位角 A、俯仰角 E 和多普勒速率 V,测距、测角、测速误差分别为 10 m,0.5 m/rad,1 m/s,数据采样率为 20 Hz. 机动频率 α 分别取 10,1 和 0.01,进行 100 次蒙特卡洛仿真. 位置、速度滤波的均方根误差分别如图 1、图 2 所示.

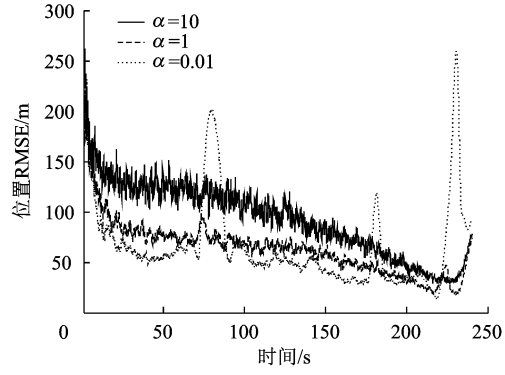


图 1　CS-UKF 的位置滤波均方误差

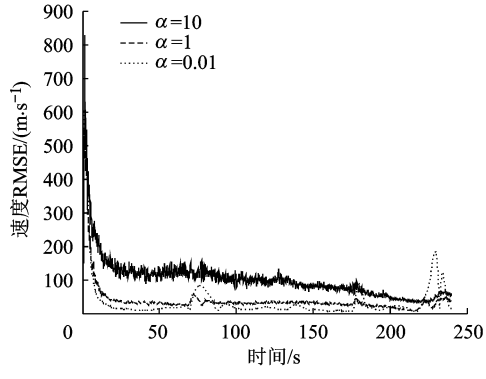


图 2　CS-UKF 的速度滤波均方误差

从图 1 和图 2 可见:从整体上看,α 越小,位置、速度的滤波精度越高,但在某些时段,误差跳变现象越严重——突跳幅度越大、再次收敛所需时间越长.

仿真结果支持了上节理论分析的结论. 误差跳变的时段正对应着该多级弹道目标的级间分离段和头体分离段,此时目标加速度变化剧烈;而其他时段为各级稳定工作段,加速度连续缓慢变化,在采样周期内近似为匀加速运动.

若能实时检测目标机动,在各级稳定段采用较小的 α(如 0.01),在级间分离和头体分离等强机动段采用较大的 α(如 10),就能在保证各级稳定段高精度的同时抑制强机动段误差突跳幅度、

缩短再收敛时间,从而改善主动段滤波性能.

2 机动检测

机动检测的实质是变化检测,基本思想是:当目标未发生机动时,实际运动过程与运动模型相吻合,滤波残差为零均值的高斯白噪声序列;而当目标发生机动时,实际运动过程与原来的运动模型失配,滤波残差序列将发生急剧变化. 因此机动检测就是尽可能快地判断出高斯白噪声序列中是否出现了非高斯信号.

2.1 传统检验统计量

机动检测作为一个假设检验问题,最重要的是构造合适的检验统计量、确定其概率分布和相应的检测门限. 这里设 H_0 表示目标未机动,H_1 为备择假设,表示目标进行机动. 最基本的检验方法是基于残差平方和的 χ^2 检验,常用的统计量有如下 3 种[6]:

$T_1:\varepsilon_k=\tilde{\boldsymbol{Z}}'_k\boldsymbol{S}_k^{-1}\tilde{\boldsymbol{Z}}_k$,归一化残差平方和,其中 $\tilde{\boldsymbol{Z}}_k$ 为第 k 时刻的滤波残差(新息)向量,$\boldsymbol{S}_k$ 为残差的协方差阵.

$T_2:\varepsilon_k^s=\sum_{j=k-s+1}^{k}\varepsilon_j$,在长度为 s 的窗内对归一化残差平方和进行累积.

$T_3:\varepsilon_k^\rho=\sum_{j=1}^{k}\rho^{k-j}\varepsilon_j=\rho\varepsilon_{k-1}^\rho+\varepsilon_k$,对归一化残差平方和进行衰减累积,衰减因子为 ρ.

H_0 时,T_1,T_2 服从 χ^2 分布,T_3 的分布比较复杂,常用 χ^2 分布来近似. 设残差向量维数为 n_z,给定检验显著性水平 κ,就可以得到它们的理论检测门限分别为 $\lambda_1=\chi_\kappa^2(n_z)$,$\lambda_2=\chi_\kappa^2(sn_z)$,$\lambda_3\simeq\frac{1}{1+\rho}\chi_\kappa^2\left(\frac{1+\rho}{1-\rho}n_z\right)$.

通过仿真发现,这三种统计量无法满足本文的应用需求. 因为多级弹道目标在主动段一直处于机动状态,只是机动的强弱不同,没有非机动运动阶段. 在各级稳定段,滤波残差并不是严格的高斯白噪声序列,也含有非高斯成分. 如果采用 χ^2 检验方法,在各级稳定段会有较高虚警率. 若依靠增加滑窗长度来降低虚警率,又会增大检测延迟,达不到根据检测结果及时调整滤波器的目的. 另一方面,当目标进行强机动时,反而可能检测不到变化. 如一段高斯白噪声序列与它的绝对值序列,在分布特征上有显著差异,但在 χ^2 统计量上并没有区别. 因此需要研究新的机动检测方法,能用于不断机动的目标以检测其机动强度的变化.

2.2 新型检验统计量

数十年来,关于机动检测自适应滤波技术的研究一直未曾间断. 各类文献中提出的算法不胜枚举,但绝大多数都集中在如何进行自适应滤波,而检测自适应算法的核心基础——机动检测方法却没有太多创新. 文献[7-8]提出了一类基于多普勒速度测量的机动检测方法,结合滤波器输出和多普勒速度测量值估计目标加速度,进而构造检验统计量. 文献[9]提出了基于残差的三阶累积量进行机动检测. 但这些方法与 2.1 节中基于残差平方和的 χ^2 检验方法一样,都假定目标运动只在非机动、匀加速运动、匀速转弯等几种确定的运动模式之间转换,不适用于不断机动的多级弹道目标主动段以检测机动强弱的变化.

本文提出的新型检测方法基于相关检测技术. 在微弱信号检测中,相关检测技术得到了广泛应用[10]. 这是由于噪声一般是不相关的,而信号都具有某种相关性,经过相关运算后,信号的能量得到累积,检测信噪比得以提高.

2.2.1 统计量构造

新型检验统计量构造过程如下:

1)残差归一化

$$\boldsymbol{v}_k=\tilde{\boldsymbol{Z}}_k./\sqrt{\mathrm{diag}(\boldsymbol{S}_k)}\tag{2}$$

式中,$\mathrm{diag}(\boldsymbol{S}_k)$ 表示由矩阵 $\boldsymbol{S}_k$ 主对角元素构成的向量;$(./)$ 表示向量对应元素相除.

2)滑窗内求均值

$$\bar{\boldsymbol{v}}_k=\frac{1}{s}\sum_{j=k-s+1}^{k}\boldsymbol{v}_j\tag{3}$$

3)均值序列延迟相关

$$\boldsymbol{\eta}_k=\sum_{j=k-m+1}^{k}\bar{\boldsymbol{v}}_{j-1}\cdot\bar{\boldsymbol{v}}_j\tag{4}$$

这里 $(\cdot)$ 表示向量对应元素相乘.

4)标量化

$$T_4:\eta_k=\sum_{j=1}^{n_z}w_j\boldsymbol{\eta}_{k|j|}\tag{5}$$

其中,$\boldsymbol{\eta}_{k|j|}$ 表示 $\boldsymbol{\eta}_k$ 中第 j 个元素;w_j 为相应权值.

2.2.2 概率分布

假设各测元通道相互独立,不失一般性,在一维测元情况下,研究 H_0 成立时新统计量 T_4 的概率分布及理论检测门限 λ_4. 此时残差向量退化为标量,有

$v_k\sim N(0,1)$,$\{v_k\}$ 为不相关高斯白噪声,

$\bar{v}_k\sim N\left(0,\frac{1}{s}\right)$,$\{\bar{v}_k\}$ 为相关噪声,且

$$E[\bar{v}_k\bar{v}_j]=\begin{cases}0, & |j-k|\geqslant s\\ (s-|j-k|)/s^2, & |j-k|<s\end{cases}$$

记 $\boldsymbol{X}^{(1)}=[\bar{v}_{k-m},\cdots,\bar{v}_{k-1}]'$,$\boldsymbol{X}^{(2)}=[\bar{v}_{k-m+1},\cdots,\bar{v}_{k}]'$,则检验统计量 T_4 为

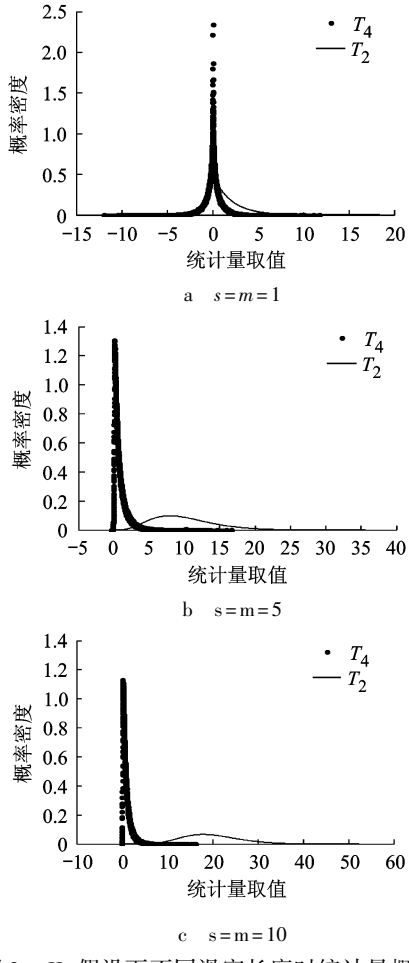
$$\eta_k=\boldsymbol{X}^{(1)'}\boldsymbol{X}^{(2)} \tag{6}$$

T_4 的概率分布在文献[11]中进行了相关分析:只有当 $s=m=1$ 时,才存在解析形式的概率密度函数:

$$p(\eta_k=x)=\frac{1}{\pi}K_0(|x|) \tag{7}$$

其中 $K_0(x)$ 为第二类修正贝塞尔函数. 其他情况下均没有解析表达式.

本文通过计算机仿真给出其大量样本的分布情况,以近似概率密度函数,并获得检测门限. 随机仿真 1 000 000 次,检验显著性水平取 0.005,滑窗长度分别取 1,5,10($s=m=1,5,10$). 计算 k 时刻 T_4 的值需要用到之前 $s+m$ 个时刻的残差,因此 T_4 的等效窗长为 $s+m$. 不同滑窗长度下 T_4 与其等效窗长的 T_2 概率分布如图 3 所示. 通过数值仿真,可确定窗长为 1,5,10 时 T_4 的检测门限 λ_4 分别为 3.62,5.39,5.59.



a　$s=m=1$

b　s=m=5

c　s=m=10

图 3　H_0 假设下不同滑窗长度时统计量概率分布

由图 3 可见:相较传统的检验统计量,新统计量利用噪声的不相关性大大压缩了分布范围,降低了噪声能量,而由目标机动产生的相关性非高斯信号的能量经过相关运算则会得到累积. 由此可提高检测信噪比,缩短检测延迟.

2.3　机动检测仿真

基于 1.2 节中的弹道目标主动段跟踪实例,对检验统计量 $T_1\sim T_4$ 的机动检测效果进行仿真比较. 跟踪滤波时使用雷达提供的全部 4 种测元(A,E,R,V),但计算统计量时仅利用测速这一维残差数据,因为通过仿真发现测速元对目标机动更敏感. 为保证 $T_2\sim T_4$ 的等效窗长相同,这里取 T_2 的窗长为 10,T_3 的衰减因子为 0.9(等效窗长为 10),T_4 的窗长为 $s=m=5$. 显著性水平均取为 0.005. 滤波算法采用机动频率 $\alpha=0.01$ 的 CS-UKF 算法,蒙特卡洛次数为 100 次. 图 4 为目标 jerk(加加速度绝对值)曲线. 对 CS 模型而言,jerk 大小可表征目标机动强弱. 图 5 为 100 次蒙特卡洛仿真中 4 种检验统计量的取值与对应理论检测门限之间的关系图.

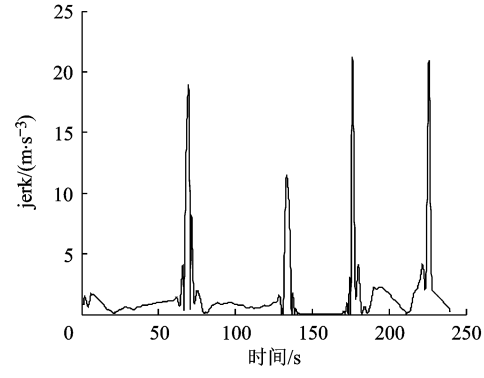


图 4　多级弹道目标的 jerk 曲线

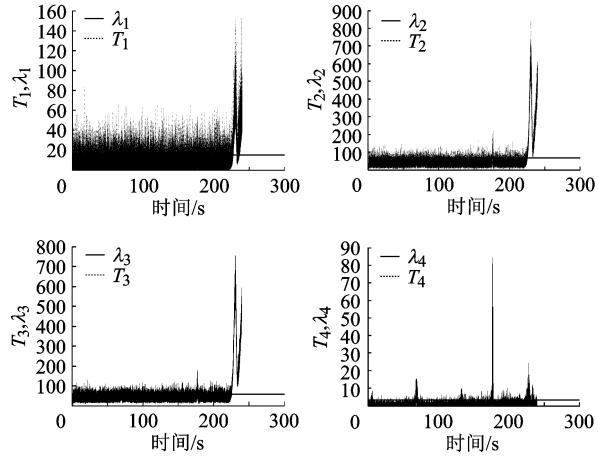


图 5　4 种检验统计量的检测结果

对比图 4 和图 5 可见:新统计量有效降低了虚警率,同时提高了检测概率,可检测出该弹道目标的四处强机动;而 T_1 仅能检测出第 3 处机动,另 3 处机动几乎无法检测出,且在各级稳定段的虚警率很高;T_2,T_3 的检测性能有所改善,但只能检测出第 3,4 处机动.

3 自适应 CS-UKF

本文仅给出一种简单的自适应算法——根据检测到的目标机动情况实时切换选择更合适的机动频率 α:滤波开始时采用较小的 α(记为 α_1),每个滤波周期结束进行机动检测,若检测到强机动,下一滤波周期采用较大的 α(记为 α_2);若没有检测到机动,下一滤波周期则采用 α_1. 如此进行序贯滤波.

仍以 1.2 节中的跟踪实例验证算法性能. 取 $\alpha_1=0.01$, $\alpha_2=10$,蒙特卡洛仿真次数为 100 次. 将本文的自适应算法简记为 MCS-UKF(Modified CS-UKF). 它与原算法的位置、速度滤波均方误差如图 6 和图 7 所示. 从图中可以看出,自适应算法有效抑制了误差跳变幅度,而且缩短了误差突跳后再次收敛所需的时间,将主动段整体滤波精度提高了一倍以上.

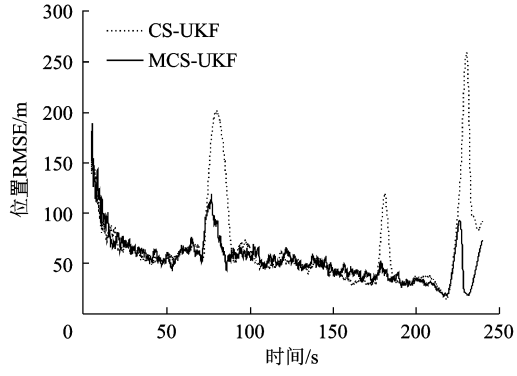


图 6 2 种算法位置滤波均方误差

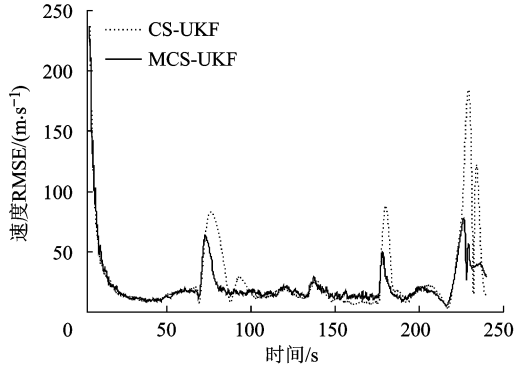


图 7 2 种算法速度滤波均方误差

4 结 束 语

本文针对多级弹道目标主动段实时跟踪滤波中在级间分离、头体分离等强机动段落出现滤波误差大幅突跳的问题,提出了一种根据机动检测结果实时切换机动频率的自适应 CS-UKF 算法. 该算法的核心是本文提出的一种新型机动检测方法. 检验统计量基于滤波残差的滑窗均值构造,利用了相关去噪技术,提高了机动检测信噪比,尤其适用于不断机动的目标. 将该机动检测方法与自适应滤波、输入估计、变维滤波、交互多模滤波等技术相结合,对滤波器的关键模型参数、目标运动模型甚至滤波器结构等进行在线实时调整,可有望进一步改善目标跟踪算法的精度、鲁棒性以及快速收敛性等重要性能,具有广阔的应用空间.

参考文献(References)

[1] 慈颖. 导弹飞行试验主动段实时测控信息融合方法研究[D]. 北京:北京跟踪与通信技术研究所,2008
Ci Ying. Research on real-time TT&C information fusion method for missile boost phase flight[D]. Beijing: Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, 2008 (in Chinese)

[2] 张毅,杨辉耀,李俊莉. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999:121-125
Zhang Yi, Yang Yaohui, Li Junli. Ballistic missile ballistics[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999:121-125(in Chinese)

[3] 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,1991:138-140
Zhou Hongren, Jing Zhongliang, Wang Peide. Maneuvering target tracking[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 138-140(in Chinese)

[4] Kim J W, Vaddi S S, Menon P K, et al. Comparison between nonlinear filtering techniques for spiraling ballistic missile state estimation [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2012, 48(1):313-328

[5] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3):401-422

[6] Li X R, Jilkov V P. Survey of maneuvering target tracking: decision-based methods[C] //AeroSense 2002. Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets. Orlando, FL, USA: [s. n.], 2002, 4728:511-534

[7] Bizup D F, Brown D E. Maneuver detection using the radar range rate measurement[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(1):330-336

[8] Ru J F, Chen H, Li X R, et al. A range rate based detection technique for tracking a maneuvering target[C]//Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets. San Diego, California: [s. n.], 2005, 5913:1-13

[9] Lan Y, Lv Z J, Jiang W. A novel maneuver detection method based on residual third-order cumulants[J]. Dianxun Jishu/ Telecommunications Engineering, 2012, 52(5):680-683

[10] 李锐,何辅云,夏玉宝. 相关检测原理及其应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(4):573-575
Li Rui, He Fuyun, Xia Yubao. Theory of correlation detection and its application[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(4):573-575(in Chinese)

[11] Marvin K S. Probability distributions involving Gaussian random variables [M]. Springer, 2006:38-52

(编 辑:娄 嘉)