doi:10.11887/j.cn.201403029 http://journal.nudt.edu.cn

应用观测新息和状态信息检测联合脉冲机动*

黄 普,钱 山,李恒年
(宇航动力学国家重点实验室,陕西 西安 710043)

摘 要:针对提高空间机动目标跟踪精度的机动检测问题,提出一种新型机动检测方法——$\chi^2-\beta$检测法。该算法以脉冲前后沿为研究对象,通过分析观测新息和常推力$\alpha-\beta$动力学模型中辅助变量β的物理特性,给出脉冲机动前后沿检测判据。仿真实验比较了χ^2检测法和β检测法的特性,结果表明:χ^2检测法,对机动前沿的敏感性与采样点和机动阀值相关,较多的采样点与较大的机动阀值可以降低虚警率,但会增加检测延时,反之,可以减小检测延时,但会增加虚警率;β检测法,对机动后沿的敏感性与滤波跟随性能相关,在测量精度的保证下,可对机动后沿准确检测。两种方法联合起来,可有效检测多种形式脉冲机动,性能优于传统的机动检测方法,具有一定的工程实用性。

关键词:机动检测;$\chi^2-\beta$检测法;χ^2检测器;β检测器
中图分类号:TP316 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)03-0164-05

Combined method of impulse maneuver detection based on observation innovation and system state information

HUANG Pu, QIAN Shan, LI Hengnian
(State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: Aimed at the problem that maneuver detection delay causes the uncertainty of tracking maneuvering target, a combined detection method ($\chi^2-\beta$) was proposed for tracking maneuvering spacecraft with impulse power. By using Observation Innovation and $\alpha-\beta$ maneuver dynamics model, the method detected the impulse maneuver to track maneuvering satellite. Through simulation and analysis, a comparison between the χ^2 detection method with β detection method was made. It proves that the sensitivity of χ^2 detection to maneuvering frontier correlate with the sampling points and motor threshold. The combined detection method does not incur much computation and, is superior to the traditional method, thus it has practicality in satellite engineering.

Key words: maneuver detection; $\chi^2-\beta$ detection; χ^2 detection; β detection

机动目标跟踪作为目标跟踪的一个重要分支,可以实现对多种机动目标运动状态的跟踪。但是,这些跟踪算法的运动模型往往是事先假定的,并且系统噪声和观测噪声是已知的。然而,假设条件通常与实际中的目标跟踪环境是不符合的,而一旦模型不符(当机动发生时必然发生),则可能导致目标跟踪失败[1-2]。因此,及时进行正确的目标检测,确认目标当前机动状态,适时更换目标机动模型,是机动目标跟踪问题的关键。本文将重点放在机动检测技术上。

所谓的目标机动检测,实质是一种判别机制[1-2],在目标发生机动后,出现模型不匹配,带来的直观变化是测量新息的剧烈变化,于是,利用测量新息的变化建立目标机动的决策逻辑,成为主要发展方向[1]。然而,测量新息不经过统计处理会带来虚警和决策的困难,可利用数理统计的工具,针对新息序列进行相应处理,如求取归一化的残差平方和,残差累加和等,使得新的序列服从某种具体的概率分布(高斯分布,二项分布等),从而获得一定虚警率条件下的检测门限[1,3-4]。

目前,机动检测的分类有很多,主要分类方法是根据检测器输入统计信息和结构来分类,根据检测器输入的统计信息,可分为5个类别[3-4]:基于观测新息的机动检测,基于输入估计的机动检测,基于伪残差的机动检测,基于距离变化率的机动检测和基于上述信息以外的机动检测。本文在李恒年[5-6]建立的$\alpha-\beta$动力学模型的基础上,进一步分析了辅助变量β的特性,提出一种新型机动检测方法,融合了观测信息和系统状态信息,可有效检测脉冲机动。

* **收稿日期**:2013-05-10
作者简介:黄普(1982—),男,陕西韩城县人,硕士,工程师,E-mail:shanqian_123@163.com

1　基于状态信息的 β 机动检测方法

基于状态信息的 β 机动检测方法,不同于传统的观测残差检测,它通过加速度模型与发动机推进剂质量秒耗量和比冲的关系,提出了辅助变量 β,完善了推力加速度微分模型[5-6],避免了卫星质量和比冲的不确定性引起推力加速度的估计误差,而辅助变量的物理特性又为机动检测提供了判决,检测步骤如下所示。

步骤 1　定义卫星机动动力学控制系统变量 $\boldsymbol{X}=[\boldsymbol{r}\quad \dot{\boldsymbol{r}}\quad \alpha\quad \beta]^{\mathrm{T}}$,建立增广系统动力学模型

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}\dot{\boldsymbol{r}}}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t}\\ \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}t}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{r}}\\ g_r\cdot\boldsymbol{r}+g_w\cdot\boldsymbol{w}_e^o+\alpha\cdot\boldsymbol{p}\\ \beta\cdot\alpha\\ \beta^2\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中

$$\beta=\frac{\dot{m}}{m(t)}=\frac{\dot{m}}{m_0-\dot{m}(t-t_0)}$$

步骤 2　根据观测新息,进行卡尔曼滤波,设置初始状态 $\alpha=\beta=0$。

当目标没有机动时,质量消耗量 $\dot{m}=0$,由辅助变量 β 关系式可知 $\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}t=0$, $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t=0$,状态变量 α, β 持续为 0。

步骤 3　根据辅助变量 β 的特性,检测目标机动,根据脉冲方向与速度方向的不同,检测分 4 种情况:

1)脉冲方向与速度方向同向为正,则脉冲机动后,速度方向迅速产生正向增量 ΔV,与无动力模型不匹配,观测新息将通过滤波增益修正状态误差,由辅助变量 β 关系式可知,若 $\beta>0$,可知 $\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}t>0$,且 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t>0$,即加速度 α 持续正向增加,与现实相符。

当目标机动停止时,速度方向没有增量,模型返回无动力状态,加速度 α 应正向减少,直至为 0,由 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t$ 关系式可知此时辅助变量 β 应小于 0,这与 $\beta(t)$ 的物理意义不符,此时可以判断脉冲机动结束。

2)当速度方向为正,脉冲方向为负时,脉冲机动后,速度方向迅速产生负增量 ΔV,与无动力模型不匹配,观测新息将通过滤波增益修正状态误差,由辅助变量 β 关系式可知, 若 $\beta>0$,可知 $\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}t>0$,且 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t<0$,加速度 α 持续负向增加,与现实相符。

当目标机动停止时,速度方向没有增量,模型返回无动力状态,加速度 α 应负向减少,直至为 0,由 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t$ 关系式可知此时辅助变量 β 应小于 0,这与 β 的物理意义不符,此时可判断脉冲机动结束。

其余两种情况与上述情况类似,可自行推导。

步骤 4　考虑到脉冲机动开始时刻往往也是机动结束时刻, β 检测也可以更加准确及时地检测脉冲机动开始。

综上所述, β 机动检测判据,源于目标加速度的变化,通过加速度的变化影响 β 变化,通过 β 的变化完成机动后沿检测。

2　基于观测新息的机动检测

考虑如下的线性系统

$$\begin{aligned}\boldsymbol{X}(k+1)&=\boldsymbol{\Phi}(k+1,k)\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{\Gamma}(k)\boldsymbol{W}(k)\\ \boldsymbol{Y}(k)&=\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{V}(k)\end{aligned}\tag{2}$$

式中

$\boldsymbol{\Phi}(k+1,k)\in\boldsymbol{R}^{m\times m}$, $\boldsymbol{\Gamma}(k)\in\boldsymbol{R}^{m\times m}$ 和 $\boldsymbol{H}(k)\in\boldsymbol{R}^{l\times m}$ 分别为状态转移矩阵、模型噪声传递矩阵和观测矩阵。$\boldsymbol{W}(k)\in\boldsymbol{R}^{m\times 1}$ 和 $\boldsymbol{V}(k)\in\boldsymbol{R}^{l\times 1}$ 分别为互不相关的零均值高斯白噪声,其协方差矩阵分别为 $\boldsymbol{Q}(k)$ 和 $\boldsymbol{R}(k)$。

如果对系统方程应用卡尔曼滤波,并且假设初始状态 $\boldsymbol{X}(0)$ 与 $\boldsymbol{W}(k)$ 和 $\boldsymbol{V}(k)$ 互不相关,那么,由“新息理论”可知,新息向量及二阶协方差矩阵为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{d}(k)&=\boldsymbol{Y}(k)-\boldsymbol{H}(k)\hat{\boldsymbol{X}}(k,k-1)\\&=\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{X}(k,k)+\boldsymbol{V}(k)-\boldsymbol{H}(k)\hat{\boldsymbol{X}}(k,k-1)\\&=\boldsymbol{H}(k)\tilde{\boldsymbol{X}}(k,k-1)+\boldsymbol{V}(k)\end{aligned}\tag{3}$$

$$\boldsymbol{S}(k)=\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{P}(k,k-1)\boldsymbol{H}(k)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R}(k)\tag{4}$$

式中,$\hat{\boldsymbol{X}}(k,k-1)$ 为一步预测状态估计,$\boldsymbol{P}(k,k-1)$ 为预测协方差矩阵。

以式(2)、(3)为基础,在线估计新息量的均值和方差分布情况,从而判断机动是否发生。

当目标没有机动时,由于估计的无偏性,可得

$$E[\boldsymbol{d}(k)]=E[\boldsymbol{H}(k)\tilde{\boldsymbol{X}}(k,k-1)+\boldsymbol{V}(k)]=0,$$

$$Var[\boldsymbol{d}(k)]=\boldsymbol{H}(k)\boldsymbol{P}(k,k-1)\boldsymbol{H}(k)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R},$$

式中,$\boldsymbol{d}(k)\approx N(0,Var(\boldsymbol{d}(k)))$,即新息向量为 m 维零均值高斯白噪声。

定义 $D(k)=\boldsymbol{d}(k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}^{-1}(k)\boldsymbol{d}(k)$ 为距离函数,由新息序列的统计性质可知,$D(k)$ 服从自由度为 m 的 χ^2 分布。如果目标发生机动,新息 $D(k)$ 将不再是零均值高斯白噪声,$D(k)$ 将会变大,因此,可据此设定检测门限,确定机动的发生与消除。

取 $D(k)$ 大于某一门限 M 的概率为 P_r, P_r 为

允许的虚警概率,表示实际目标无机动而判为机动的概率。门限 M 取的越高,P_r 越小,反之亦然,同时门限 M 取的越高,产生机动检测滞后时间越长。

此时,χ^2 检测滤波过程为:

当 $D(k)>M$ 时,机动发生,可进行状态噪声方差补偿,即增大 $\boldsymbol{Q}$ 矩阵。

当 $D(k)\leqslant M$ 时,机动消除,恢复 $\boldsymbol{Q}$ 矩阵。

以上即为残差 χ^2 检验法的单样本算法[1,3-4],包括残差生成、检验统计量构造、决策及方差补偿4个步骤。单样本算法仅利用了当前时刻的残差信息,实际应用中很容易受到测量异常值和干扰的影响。为了获得更好的数值稳定性同时降低误报率和漏检率可采用多样本算法,即同时利用最近 N 个时刻的归一化残差。

$$\bar{C}_k = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} C_{k-i} \tag{5}$$

式(5)中,N 是采样数;$\bar{C}_k$ 代表采样的真实均值,$N\bar{C}_k$ 服从自由度为 Nm 的 χ^2 分布,即 $N\bar{C}_k \in \chi^2(Nm)$。相对于单样本算法来说,多样本算法的优点是降低了单样本带来的误报率和漏检率,缺点是数据存储量大,且可能带来一定的检测延迟,实际应用中要合理选择采样数 N 的大小。

综上所述,χ^2 机动检测判据,源于目标速度的变化,通过速度的变化影响残差的二阶统计特性,完成机动前沿检测。

3 联合机动检测跟踪策略

联合机动检测跟踪策略,以脉冲机动前后沿为研究对象,利用观测新息的二阶统计特性与常推力 $\alpha-\beta$ 动力学模型中辅助变量 β 的物理特性,针对性地建立两种检测器:χ^2 检测器,利用了观测新息的二阶统计特性,对脉冲机动前沿具有敏感性;β 检测器,利用了精确 $\alpha-\beta$ 动力学模型中辅助变量 β 的物理特性,对脉冲机动后沿具有敏感性,两种检测器,检测信息不同,检测方式不同,互为补充,联合作用,适应多种形式的脉冲机动。

对于已经检测出来机动的滤波器,需要通过调整滤波参数 P 和 Q 完成多模型切换,提高状态方程与飞行状态的匹配程度,也可采用重启滤波器的方式获得更快的收敛速度和滤波稳健性。

4 仿真分析

下面仿真分析某飞行器机动过程中 χ^2 检测器和 β 检测器的计算性能。计算中,测量数据为4个地面测站的联合仿真数据(R,dR),并加载与各设备性能相当的随机误差,测距:10m,测速:0.2m/s。仿真弹道共计400s,滤波初值误差考虑在三个方向位置和速度上分别加20m和1m/s的常值误差。图1表示飞行器机动全过程的高度曲线;图2表示飞行器机动全过程的三维弹道曲线;图3表示飞行器的机动控制加速度变化曲线在180s时存在一次脉冲机动,机动加速度为12.6m/s^2,持续时间10s;图4表示当不采用机动检测器时滤波全过程位置误差,在机动发生后位置误差逐渐增大,发散。

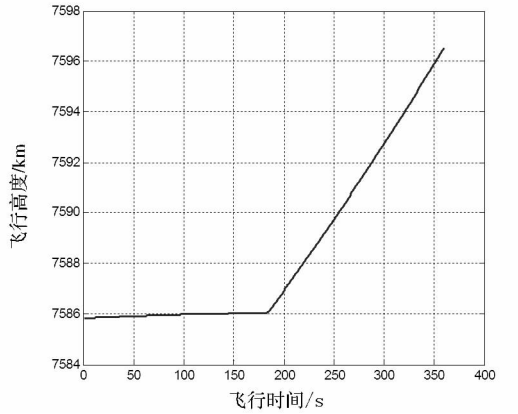


图1 高度曲线

Fig. 1 Altitude graph

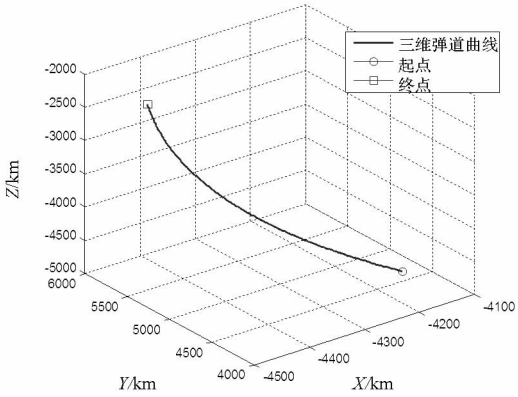


图2 三维弹道曲线

Fig. 2 3D trajectory graph

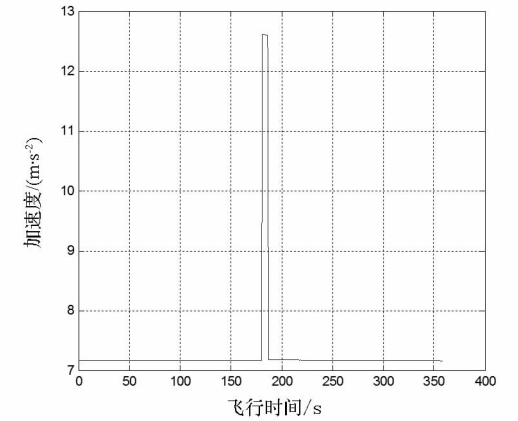


图3 机动控制加速度变化曲线

Fig. 3 Maneuver acceleration changing graph

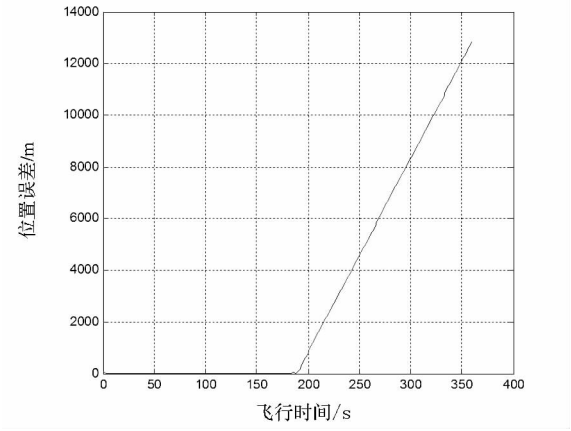


图 4　位置误差曲线

Fig. 4　Position error graph

当只采用χ^2 检测器时,滤波全过程位置误差如图 5、图 6 所示,全过程位置误差优于 50m。但是由于χ^2 检测器采用多样本方式,存在一定的检测延时,由图 5 可看出,在 195s 检测出机动发生,与机动前沿相比延迟 15s。

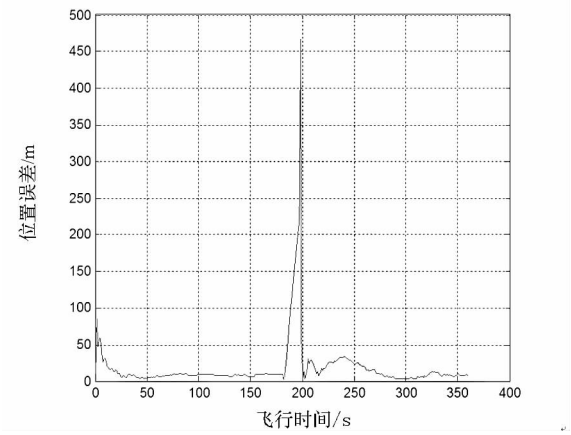


图 5　χ^2 检测器滤波位置全过程

Fig. 5　Process of position filter with χ^2 detection

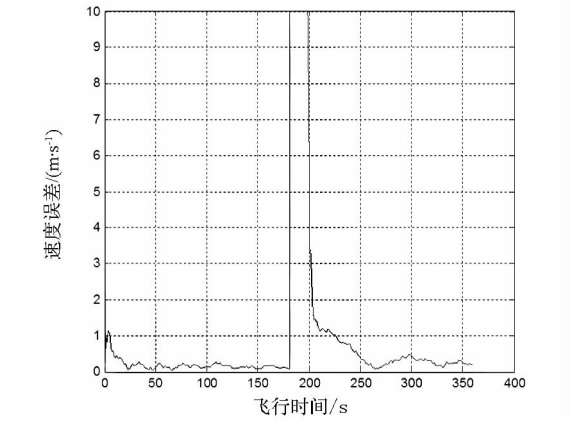


图 6　χ^2 检测器滤波速度全过程

Fig. 6　Process of velocity filter with χ^2 detection

当采用β 检测器,滤波全过程位置误差与速度误差如图 7、图 8 所示,位置总误差优于 10m,

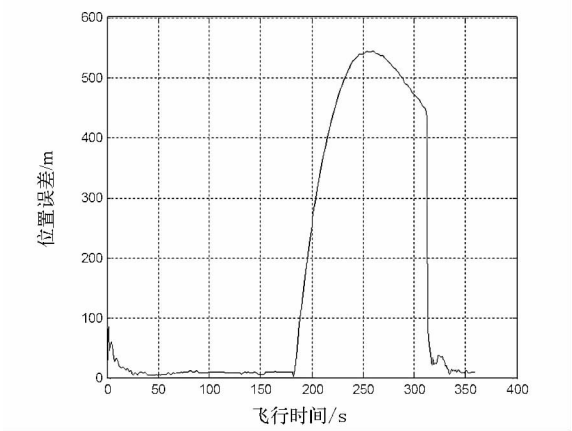


图 7　β 检测器滤波位置全过程

Fig. 7　Process of position filter with β detection

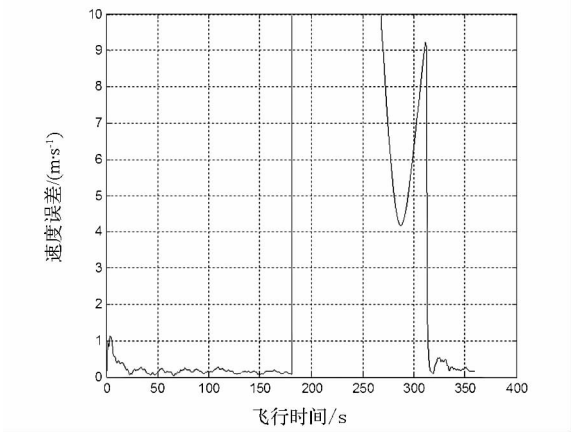


图 8　β 检测器滤波速度全过程

Fig. 8　Process of velocity filter with β detection

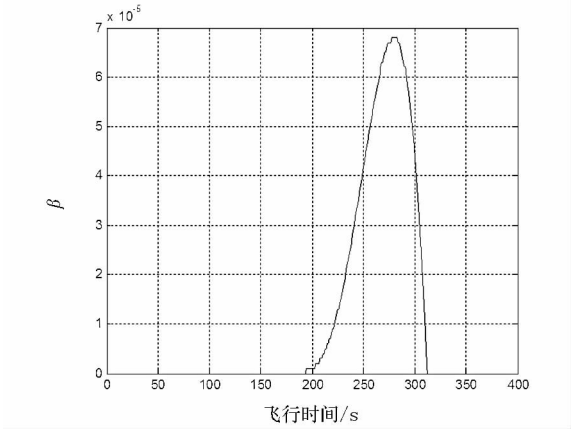


图 9　β 检测器滤波 β 变化全过程

Fig. 9　Process of β changing with β detection

速度误差优于 0.5m/s。延迟 120s,分析原因,这是由滤波跟随性能决定,在机动发生后,β 经历一个变大变小的过程,如图 9 所示,β 变化过程,造成检测延时,在 310s 变负,完成机动检测。

当调整模型噪声误差矩阵 $\boldsymbol{R}$ 与观测随机误差(测距:5m,测速:0.05m/s)后,β 检测器滤波全过程位置误差与速度误差如图 10、图 11 所示,

位置总误差优于 10m，速度误差优于 0.5m/s，基本没有延时，在 190s，完成机动检测，分析原因，因为此时测量信息可信度更高，滤波跟随性能大大提高，相应检测更加灵敏。

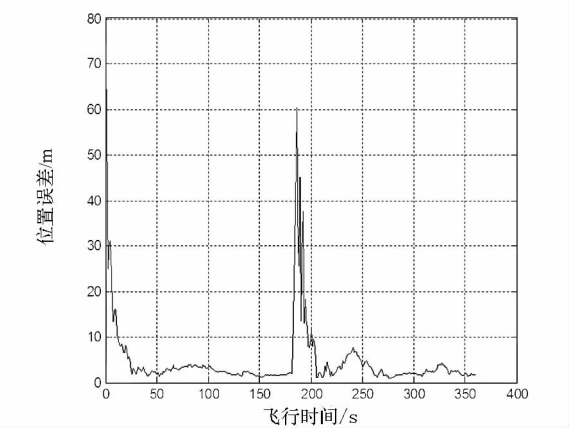


图 10 β 检测器滤波位置全过程

Fig. 10 Process of position filter with β detection

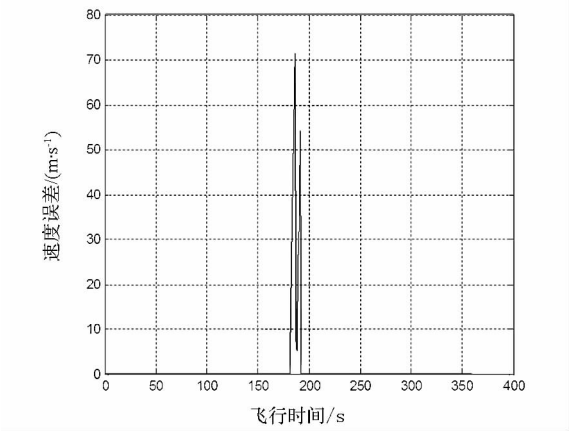


图 11 β 检测器滤波速度全过程

Fig. 11 Process of velocity filter with β detection

5 结束语

本文提出一种基于观测新息和系统状态信息的联合机动检测方法($\chi^2-\beta$ 检测)，通过仿真分析，比较了两种方法的特点，结果表明：χ^2 检测方法，利用了观测新息的二阶统计特性，对脉冲机动前沿具有敏感性，但单样本会造成漏检现象，多样本会造成一定的检测延时，为此需要选择合理的样本数与机动检测门限；β 检测方法，利用了精确 $\alpha-\beta$ 动力学模型中辅助变量 β 的物理特性，对脉冲机动后沿具有敏感性，但敏感性与滤波跟随性能有关，需要测量精度的保证。两种检测方法各有所长，联合作用，可满足多种脉冲式机动，具有一定的工程应用价值。

参考文献(References)

[1] Li X R, Jilkov V P. A survey of maneuvering target tracking-part IV: decision-based methods [C] Proceedings of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, 2002, 511 - 534.

[2] Li X R, Jilkov V P. A survey of maneuvering target tracking-part V: multiple-model methods [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41 (4): 1255 - 1321.

[3] 范红旗，王胜，付强. 目标机动检测算法综述 [J]. 系统工程与电子技术，2009，31(5)：1065 - 1070.
FAN Hongqi, WANG Sheng, FU Qiang. Survey of algorithms of target maneuver detection [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(5): 1065 - 1070. (in Chinese)

[4] 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，1991：56 - 64.
ZHOU Hongren, JING Zhongliang, WANG Peide. Tracking of maneuvering targets [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 56 - 64. (in Chinese)

[5] 李恒年，李济生，黄永宣. 轨道机动过程中推力加速度的在线最小方差估计 [J]. 空间科学学报，2002，22(4)：357 - 362.
LI Hengnian, LI Jisheng, HUANG Yongxuan. On-line minimum variance estimator for thrust acceleration during orbit transfer process [J]. Chinese Journal of Space Science, 2002, 22(4): 357 - 362. (in Chinese)

[6] 李恒年，祝转民，李济生. 空间机动目标的跟踪与定位 [J]. 中国空间科学技术，2003，23(3)：13 - 18.
LI Hengnian, ZHU Zhuanmin, LI Jisheng. Tracking and navigating filter for maneuvering target [J]. Chinese Space Science and Technology, 2003, 23 (3): 13 - 18. (in Chinese)