

一种新的临近空间高超声速目标跟踪算法

李 凡¹, 毕红葵², 段 敏²

(1.空军预警学院研究生管理大队,武汉,430019;2.空军预警学院陆基预警装备系,武汉,430019)

摘要 针对变结构多模型算法(VSMM)在模型集自适应转换过程中,模型集选取容易出现只在单一类型模型中选取的问题,提出一种基于模型集匹配程度检测激活不同类模型的方法。在连续 4 个滤波周期没有激活不同类模型时,对每个周期所使用模型集与真实运动模式进行匹配程度检测,以此决定是否激活不同类模型。该方法既能有效解决模型转换的缺陷,同时避免了因单个滤波周期内检测判决导致算法切换频繁的问题。仿真结果表明,对比传统算法改进算法能有效提高跟踪性能。

关键词 临近空间;高超声速目标;变结构多模型;模型匹配

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.04.004

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)04-0019-05

A New Tracking Algorithm of Near Space Hypersonic Targets

LI Fan¹, BI Hongkui², DUAN Min²

(1. Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China;

2. Department of Land-based Early Warning Surveillance Equipment, Wuhan 430019, China)

Abstract: A new tracking algorithm of near space hypersonic target is proposed aimed at the problem that the multiple model algorithms are prone to choose only one single type of models in the process of adaptive conversion based on the degree of model matching. In four non-activated filter period of different models, detections of model matching between real-time model set and real motion model are used to decide whether to activate different classes of models. By so doing, the algorithm effectively solves not only the defects in the model transformation but also the decreasing robustness of the algorithm caused by the judgment in single filter period. The simulation results show that the improved algorithm can effectively improve the tracking performance compared with the traditional algorithm.

Key words: near space; hypersonic target; VSMM; model matches

现有的常规目标跟踪技术研究对于临近空间高超声速目标跟踪效果并不理想,目前还没有专门针对临近空间高超声速目标的探测跟踪装备,同时现役装备对临近空间空域覆盖有限^[1]。此外,临近空间高超声速目标飞行速度快,飞行环境较为复杂并具有较强的机动能力,在巡航段可以进行跳跃飞行,其运动状态可能在很短的时间内发生较大变化。导

致常规目标跟踪算法对临近空间高超声速目标难以实现较为精确、稳定的跟踪。目前临近空间高超声速目标跟踪的研究热点集中于交互多模型(IMM)算法^[2-3],文献[4]提出使用基于固定结构(FSMM)交互多模算法跟踪高速高机动目标的思路。使用大的模型集实现对目标运动模式匹配,存在模型间竞争激烈导致跟踪精度降低和计算量较大。因此,文

收稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61401504)

作者简介: 李 凡(1992-),男,湖南凤凰人,硕士生,主要从事临近空间高超声速目标跟踪算法研究。E-mail:1746338543@qq.com

引用格式: 李凡,毕红葵,段敏.一种新的临近空间高超声速目标跟踪算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(4):19-23. LI Fan, BI Hongkui, DUAN Min. A New Tracking Algorithm of Near Space Hypersonic Targets[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(4): 19-23.

献[5]分别提出了活跃有向图(AD),有向图转换(DS),自适应网格(AG)3种变结构多模型(VSMM)方法,解决了模型固定和计算量问题;文献[6]提出一种变结构多模型与粒子滤波相结合(VSMMPF)算法解决系统非线性和非高斯的问题,但存在粒子蜕化和粒子贫化的缺陷,可能直接导致跟踪发散;文献[7]提出基于模型群切换(MGS)算法,任意时刻只允许一个模型群被激活,难以适应一个周期内机动同时跨越几个模型群的运动模式;文献[8]提出将目标运动阶段作为模型转移概率的VSMM算法,实质上是一种固定结构的多模型算法。文献[9]基于活跃有向图提出了一种可能模型集(LMS-VSMM)算法,有效的减小了计算量,但模型只能由相毗邻的子模型构成,由于模型概率之和为1,而每次激活的模型数目不确定,以模型可能性与固定门限比较,决定是否激活候选模型有较大局限性。上述算法使用大模型集的VSMM算法,能较为准确的描述目标运动模式,模型的模型毗邻关系通过先验设置,容易出现模型自适应只激活同类模型的问题。

1 问题描述

考虑混合系统^[10]为:

$$\mathbf{X}(k) = f[k-1, \mathbf{X}(k-1), m(k)] + \mathbf{V}[k-1, m(k)] \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}(k) = h[k-1, \mathbf{X}(k-1), m(k)] + \mathbf{W}[k-1, m(k)] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}(k)$ 为状态向量; $\mathbf{Z}(k)$ 为量测向量; $\mathbf{V}[k-1, m(k)]$ 、 $\mathbf{W}[k-1, m(k)]$ 是 $k-1$ 时刻零均值、白色高斯过程噪声和量测噪声,且有 $E[\mathbf{V}(k)\mathbf{V}^T(k)] = \mathbf{Q}(k)$, $E[\mathbf{W}(k)\mathbf{W}^T(k)] = \mathbf{R}(k)$ 。

假定过程噪声与量测噪声相互独立, $m(k)$ 为 k 时刻系统的运动模式(模式是目标实际的运动方式,区别于模型), $m(k) \subset M$, M 为系统模型集,在FSMM算法中每一时刻系统状态估计 $\hat{\mathbf{X}}(k|k)$ 等于每个模型估计 $\hat{\mathbf{X}}_j(k|k)$ 的加权和,当只有一个或少数几个模型与当前的模式匹配时,会出现较大的跟踪误差。VSMM算法通过建立较大模型集,在对目标跟踪过程中伴随着“当前”所使用模型集的调整,解决IMM模型固定和计算量问题,如何根据目标运动特性选取模型集以及设计模型集的自适应准则是VSMM算法的主要问题。

传统的基于联通图的变结构多模型算法^[11]预先设置模型集,在滤波过程中通过各模型间毗邻关系实现模型选取自适应。使用大模型集能更加精确

表征目标机动变化,模型集较大时,VSMM算法自适应模型选取容易陷入相毗邻的同类模型中。因为模型的毗邻关系由先验信息(模型转移概率 p_{ij}) 决定,一般先验定义同类不同参数模型相似程度大于不同类模型的相似程度。根据文献[11]所设置模型集进行仿真,CG-VSMM算法 $k > 4s$ 后在不同参数的MCT模型间“聚焦”,CG-VSMM算法模型集自适应只在相同类型模型间转换,激活不同参数的MCT模型,CS与Singer模型没有参与滤波计算。用同一类型不同参数的模型描述临近空间高超声速飞行器复杂的运动特性是不够合理的,可能导致算法的机动适应性、跟踪精度、稳定性降低。

2 自适应准则改进

为了体现VSMM算法的优越性,在目标跟踪过程中至少要使用2种不同类型模型集表征目标的运动特性。针对CG-VSMM模型集切换的缺陷,在相邻 L 个滤波周期内使用模型类型不变,并且只在同类模型切换时,采用Kullback-Leiber准则分别检测 L 个周期内模型集与目标实际运动模型匹配程度,当 L 个滤波周期匹配程度呈恶化趋势,则强制激活不同类型模型参与滤波计算。匹配程度比较至少需要2个以上采样周期,模型激活后至少需要1个周期的调整当前模型在IMM滤波过程中的权值,但是检测周期过长会出现即使当前模型难以描述目标运动模式,模型匹配程度也会逐渐趋于平稳的问题;周期太短也可能导致模型切换过于频繁。参照文献[12],结合临近空间高超声速目标高速高机动的特性,取 $L=4$ 。4个滤波周期的匹配程度检测,提高了模型切换的稳定性,防止单个周期检测导致模型转换频繁。

根据CG-VSMM算法滤波思想,每一时刻选用5个模型子集参与滤波计算,将后验概率密度最大的3个模型交互输出作为滤波结果。设模型集共由 $M_{CS}, M_{Singer}, M_{CT} \dots$ 类模型组成, k 时刻滤波使用模型集为 $M_k = \{CS_1, CS_2, CS_3, CS_4, CS_5\}$, 则 $M_k \in M_{CS}$, k 时刻系统真实运动模型集为 m_k (定义为 k 时刻滤波输出的模型集合),当算法在相邻4个滤波周期内没有不同类型模型被激活,即 $M_T \in M_{CS} T = k, k+1, k+2, k+3$, 认为模型集有在CS模型“聚焦”的可能性。使用Kullback-Leiber信息判别4个滤波周期模型集与目标实际运动匹配程度 ($D_k(m_k, M_k)$ 为 k 时刻匹配程度参数)^[13]。

$$D_k(m_k, M_k) = D_k(p[z_k | m_k], p[z_k | M_k]) =$$

$$\int p[z_k | M_{k-1}, m_k, \mathbf{Z}] \ln \frac{p[z_k | M_{k-1}, m_k, \mathbf{Z}]}{p[z_k | M_{k-1}, M_k, \mathbf{Z}]} dz \quad (3)$$

式中: z_k 为 k 时刻的量测, $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^{k-1}$, \mathbf{Z}^{k-1} 表示前 $k-1$ 时刻所有的量测向量; $p[z_k | m_k]$, $p[z_k | M_k]$ 分别表示系统 k 时刻在模型 m_k , M_k 下量测 z_k 的概率密度函数。

假设 z_k 服从高斯分布:

$$p[z_k | m_k, \mathbf{Z}] = N(z_k^m, \mathbf{p}_k^m) \quad (4)$$

$$p[z_k | M_k, \mathbf{Z}] = N(z_k^M, \mathbf{p}_k^M) \quad (5)$$

式中: z_k^m 为 k 时刻基于模型 m_k 的交互量测值; \mathbf{p}_k^m 为其协方差矩阵; z_k^M 为 k 时刻基于 M_k 的交互量测值; \mathbf{p}_k^M 为其协方差矩阵。

$$z_k^m = E[z_k | m_k, \mathbf{Z}] = \sum_{m_k \in m_k} z_k^j u_k^j \quad (6)$$

$$\mathbf{p}_k^m = E[(z_k - z_k^m)(z_k - z_k^m)^T | m_k, \mathbf{Z}] = \sum_{m_k \in m_k} [p_{k-1}^m + (z_k - z_k^j)(z_k - z_k^j)^T] u_k^j \quad (7)$$

式中: z_k^j 为真实运动模型集 m_k 中模型 m_k^j 对应的量测值; u_k^j 为其后验概率。

同理可得 z_k^M , \mathbf{p}_k^M :

$$z_k^M = E[z_k | M_k, \mathbf{Z}] = \sum_{M_k \in M_k} z_k^j u_k^j \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_k^M = E[(z_k - z_k^M)(z_k - z_k^M)^T | M_k, \mathbf{Z}] = \sum_{M_k \in M_k} [p_{k-1}^M + (z_k - z_k^j)(z_k - z_k^j)^T] u_k^j \quad (9)$$

根据式(3)得:

$$D_k(m_k, M_k) = \ln(p_k^M / p_k^m) - n + \text{tr}[(p_k^M)^{-1}(p_k^m + (z_k^m - z_k^M)(z_k^m - z_k^M)^T)] \quad (10)$$

式中: $D_k(m_k, M_k)$ 反映 k 时刻所使用模型集 M_k 与目标实际运动模型 m_k 的匹配程度,其值越大表明偏差程度越大。

在 4 个滤波周期内匹配程度恶化即:

$$\frac{1}{2} \sum_{l=k}^{k+1} D_l(m_l, M_l) < \frac{1}{2} \sum_{l=k+2}^{k+3} D_l(m_l, M_l) \quad (11)$$

当前使用模型集在同类模型转换,导致 M_k 与目标实际运动模式匹配度降低。在 $k+3$ 时刻强制激活与当前最大后验概率模型相毗邻且不同类型的模型 model_x (即 $\text{model}_x \notin M_{CS}$), 取代 $k+3$ 时刻 M_k 中后验概率密度最小的模型。算法流程见图 1。

图 1 中,在滤波过程中模型集的子模型由 CG-VSMM 准则确定,当模型类型数小于 2 且模型类型与前一时刻相同时, S 计数加 1,进行匹配程度判断,只有连续 4 个周期内出现这种情况时才会判断匹配程度是否恶化,决定是否激活不同类模型,在模型选定后进行 IMM 滤波。只要在连续 4 个周期内出现一次模型类型数大于等于 2 或者模型类型与前一时刻不同, S 计数重置为 1。即使基于某次匹配

程度判断,错误激活 1 个不同类模型,但在整个算法中只选取权值最大的 3 个模型交互输出。因此,基于匹配程度检测,错误激活模型的代价比模型切换“病态”代价要小。

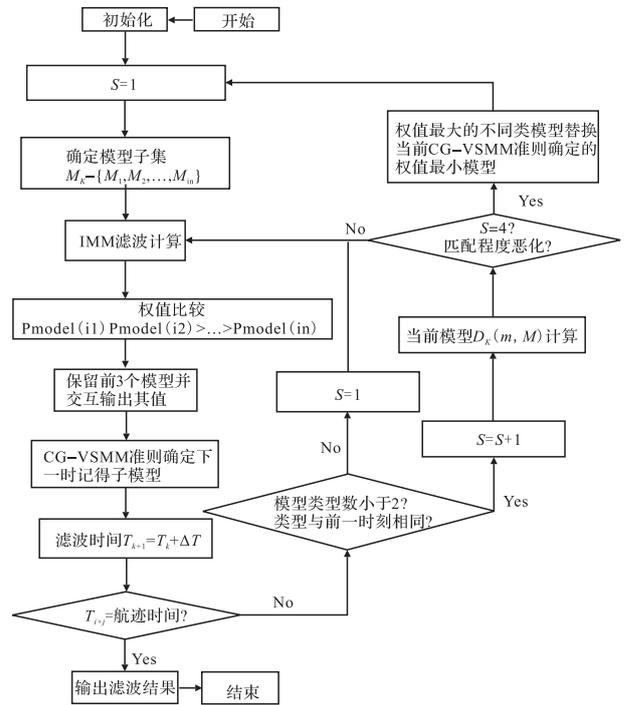


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

模型集选取应当覆盖系统主要的运动模式,本文使用有机动检测的 CS 描述“当前”目标加速度 α 机动范围和强度的变化, MCT 模型反映目标转弯运动,同时加入能表征近似匀速、匀加速的运动,对弱机动情况有较高跟踪精度的 Singer 模型,作为仿真实验模型集。

3 仿真分析

仿真以满足临近空间高超声速飞行器飞行约束 X-51A 仿真全弹道轨迹为对象,为验证新算法改进效果,将 CG-VSMM 与新算法进行对比,模型集共包含 16 个模型子集,其中 6 个 CS 模型的最大加速度分别为 $\{60, 90, 120, 200, 300, 400\}$ (m/s^2), 4 个 singer 模型的最大加速度分别为 $\{100, 200, 300, 400\}$ (m/s^2), 6 个 MCT 模型的最大角速度分别是 $\{-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3\}$ (单位: rad/s), 模型概率转移矩阵根据先验信息确定。在 Matlab7.1 中进行 100 次的 Monte-Carlo 仿真实验。

设定各模型量测噪声和状态噪声均方根值分别 $r_1 = 200, r_2 = 200$ 时,跟踪采样周期为 1 s,图 2 为目标跟踪曲线比较,图 3 为 2 种跟踪算法分别在 x, y 方向位置误差均方根值^[13]比较,图 3 为算法在 x, y

方向的速度误差均方根值比较。

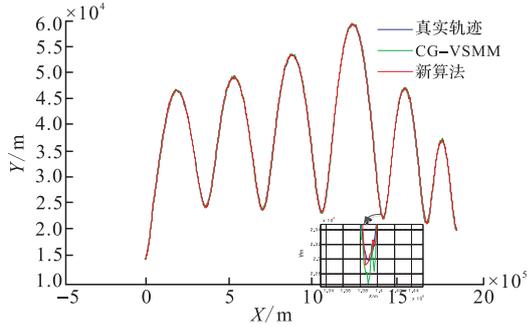
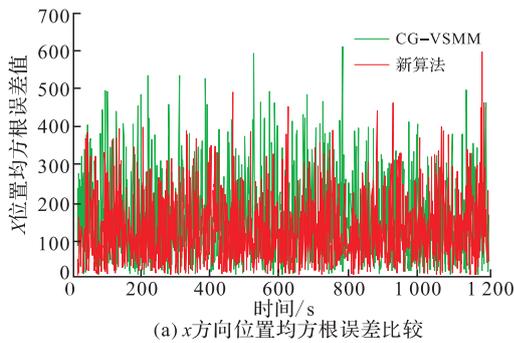


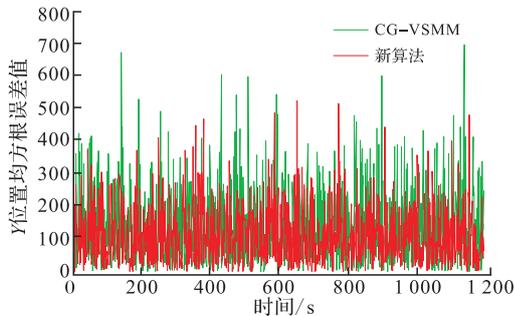
图2 滤波轨迹与真实轨迹比较

Fig.2 Algorithm flow chart

在图2中可以看出2种算法都可以实现临近空间高超声速目标跟踪,CG-VSMM的跟踪轨迹“毛刺”较多,算法稳定性较差;在目标机动转弯时跟踪曲线偏离程度加大,因机动突变导致误差升高,跟踪性能明显下降,机动适应性较差。新算法能及时激活不同类型模型对目标运动模式突变进行表征,跟踪曲线平滑,稳定性较好;在目标机动突变时,跟踪轨迹与真实轨迹偏离小于CG-VSMM算法的,收敛速度快,具有更好的机动适应性。从图3中可知新算法整体位置误差均方根值比较稳定,在没有出现机动时新算法位置误差均方根略与CG-VSMM算法相当,CG-VSMM算法出现多个因机动突变引起的速度误差均方根值突变点,新算法能更好抑制机动导致的误差均方根植激增,跟踪性能更加稳定、精度更高。



(a) x方向位置均方根误差比较

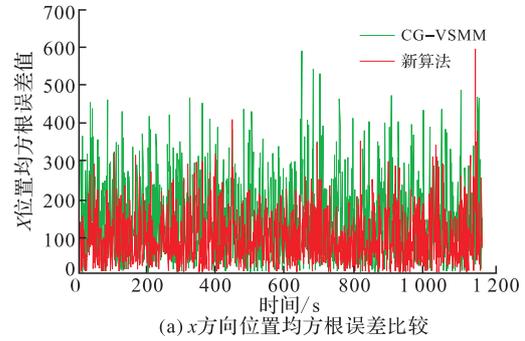


(b) y方向位置均方根误差比较

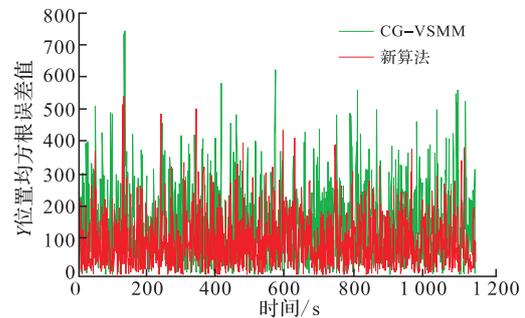
图3 位置均方根误差比较

Fig.3 Position RMSE comparison

在图4可知新算法速度均方误差明显小于CG-VSMM算法的,在目标出现机动时模型集匹配程度降低,强制激活不同类型模型参与滤波计算,能够更好地反映当前速度变化,同时避免模型自适应在同类型模型“聚焦”。



(a) x方向位置均方根误差比较



(b) y方向位置均方根误差比较

图4 速度均方根误差比较

Fig.4 Speed RMSE comparison

使用Matlab7.1的tic和toc命令对2种算法滤波过程计时,为比较算法整体性能,定义以下参数指标:总体均方差(C_{RSE})、相对误差压缩比(C_{ECC})、平均滤波时间(T)分别为:

$$C_{RSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}(i) - X(i))^2} \quad (12)$$

$$C_{ECC} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}(i) - X(i))^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z(i) - X(i))^2}} \quad (13)$$

$$T = t/M \quad (14)$$

式中: $\hat{X}(i)$ 、 $X(i)$ 、 $Z(i)$ 为滤波值、真实值、观测值; t 为算法运行总时间; M 为仿真次数; N 为观测点数; γ 为误差均方根值减小的百分比。

从表1可以看到,新算法的位置总体均方误差、速度总体均方误差、位置相对误差压缩比以及速度相对误差压缩比都小于CG-VSMM算法。在速度总体误差减小更加明显,因为新算法引入不同类模型对目标实际运动机动表征,直接体现加速度和角速度的变化,能更好的反映当前速度变化。表1从整体上说明新算法在稳定性、精度以及机动适应性等方面优于CG-VSMM算法,时耗略有增加,因为

新算法在运行与 CG-VSMM 算法相同的步骤以外,还要依据所使用模型集与当前实际运动匹配程度,判断模型集转换是否合理,进而调整下一时刻模型集的选择方案。整个飞行轨迹跟踪约有 1 200 个观测点,在实际的目标跟踪实现中只需要进行一次 Monte-Carlo 滤波即可,由此可见,虽然耗时略有提升,但单次滤波仅增加 0.265 4 s,位置误差减少约 13%,相比之下,以牺牲较小的实时性取得更高的跟踪精度。基于以上两种算法的跟踪效果分析,可以看出新算法克服模型只在同类型模型间转换的问题,基于匹配程度判断使得模型转换更加科学合理。仿真结果表明新算法在稳定性、机动适应性、跟踪精度等方面优于 CG-VSMM 算法,虽然耗时略有增加,但对算法的实时性影响不是特别严重。

表1 总体指标对比

Tab.1 Overall index contrast

指标名称	CG-VSMM		新算法		$\gamma / \%$
	C_{RSE}	C_{ECC}	C_{RSE}	C_{ECC}	
X	195.96	0.870 3	165.52	0.764 2	15.53
Y	188.73	0.856 2	165.29	0.770 0	12.62
VX	201.07	0.927 9	138.73	0.728 0	31.00
VY	198.96	0.895 4	136.52	0.695 9	31.38
T/s	1.482 7		1.748 1		

4 结语

分析了传统 CG-VSMM 算法自适应模型切换存在只在单一类型模型转换的问题。结合临近空间高超声速目标运动特性,提出了一种模型自适应改进方法,采用 Kullback-Leiber 信息作为判别模型转换是否合理,避免了模型自适应的“聚焦”,同时减小模型错误切换的可能性。仿真结果表明新算法在跟踪精度、机动适应性以及稳定性等方面优于 CG-VSMM 算法,虽然算法运行时间稍有增加,相对实时性增加的代价跟踪精度提高程度更为可观。同时在算法的实时性方面,将在下一步继续研究基于图形处理器(GPU)大规模并行数据处理提升实时性。

参考文献(References):

[1] 肖松,谭贤四,李志淮,等.基于 SCT-IMM 的临近空间高超声速目标跟踪模型[J].现代雷达,2013,35(4):15-19.
XIAO Song, TAN Xiansi, LI Zhihui, et al. Tracing Model Based on the SCT-IMM Near Space Hypersonic Target[J]. Modern Radar, 2013, 35(4):15-19. (in Chinese)

[2] 李昌玺,毕红葵,张兵,等.一种改进的临近空间高超声速目标跟踪算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(5):50-54.
LI Changxi, BI Hongkui, ZHANG Bing, et al. An Improved Tracking

Algorithm for Hypersonic Targets[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(5):50-54. (in Chinese)

[3] 关欣,赵静,张政超,等.一种可行的高超声速飞行器跟踪算法[J].电讯技术,2011,51(8):80-84.
GUAN Xin, ZHAO Jing, ZHANG Zhengchao, et al. A Feasible Tracking Algorithm for Hypersonic Aircrafts[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8):80-84. (in Chinese)

[4] BLOM H A P. An Efficient Filter for Abruptly Changing Systems [C]//Proceedings of 23rd IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas: IEEE, 1984: 656-658.

[5] 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.

[6] 张敏.基于粒子滤波的可变结构多模型估计[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
ZHANG Min. Variable Structure Multiple Model Estimation Based on Particle Filter [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)

[7] 黄翔宇.基于变结构多模型的强机动目标跟踪算法[D].杭州:杭州电子科技大学,2010.
HUANG Xiangyu. Highly Maneuvering Target Tracking Algorithm Based on Variable Structure Multiple-Model Algorithm [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University. (in Chinese)

[8] 钮俊清,单奇,任清安,等.跟踪弹道导弹全阶段的可变多模型方法[J].雷达科学与技术,2011,(3):224-231.
NIU Junqing, SHAN Qi, REN Qing'an, et al. A New Algorithm with Variable-Structure Multiple Model for Tracking Ballistic Missile at Entire Flight Stages[J]. Radar Science and Technology, 2011, (3):224-231. (in Chinese)

[9] 任继山,水娟娜,高绍明.可能模型计算法在机动目标跟踪中的应用[J].上海航天,2007,(3):58-64.
REN Jishan, SHUI Juanna, GAO Shaoming. Investigation of Maneuvering Target Tracking with Likely Model Set Algorithm[J]. Aerospace Shanghai, 2007, (3):58-64. (in Chinese)

[10] WANG Yufei, JIANG Changsheng, WU Qingxian. Attitude Tracking Control for Variable Structure Near Space Vehicles Based on Switched Nonlinear Systems[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(1):186-193.

[11] 肖松,李志淮,谭贤四,等.基于连通图的高速高机动变结构多模型算法[J].应用科学学报,2013,31(5):468-474.
XIAO Song, LI Zhihui, TAN Xiansi, et al. High Speed High Maneuvering Target Variable Structure Multiple Model Algorithm Based on Connected Graph[J]. Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering, 2013, 31(5): 468-474. (in Chinese)

[12] 沈聪辉,黄盛霖,赵晓娟.基于多周期极限采样法的极限检测器设计[J].信息与电子工程,2012,10(2):242-246.
SHEN Conghui, HUANG Shenglin, ZHAO Xiaojuan. Design of Limit Detector Based on Multi-Cycle Limit Sample Method[J]. Information and Electronic Engineering, 2012, 10(2):242-246. (in Chinese)

[13] LI W, JIA Y. Locating of Mobile Station With Maneuvers Using an IMM-based Cubature Kalman Filter[J]. IEEE Trans on Industrial electronics, 2012(11), 59(11):4388-4348.

(编辑:姚树峰)