

6-4-2020

Maneuver Models Tracking Filter of Nonballistic Near Space Targets

Qin Lei

Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

Junlong Li

Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Maneuver Models Tracking Filter of Nonballistic Near Space Targets

Abstract

Abstract: Because hypersonic vehicles in the near space often adopt the way of nonballistic maneuver flight with characteristics of high speed and lift-to-drag ratio, flying in atmosphere for a long time, whose motion trajectories are sometimes characterized by “hopping”, their flight altitudes, flight velocities and flight accelerations change. Targets maneuver are characterized by long period maneuver, which has brought great difficulties with ground defense system for maneuvering target localization and tracking. Traditional filtering algorithms obviously cannot give accurate target state estimation, tracking performance has declined. *The overview of tracking filter ways was given, introducing four typical nonballistic maneuver models of near space targets, and discussing from two aspects including tracking filter ways of different maneuver models and tracking filter ways of unknown maneuver models. The guarantee was provided for improving the accuracy of tracking filter for hypersonic vehicles in the near space and successfully intercepting hypersonic vehicles in the near space.*

Keywords

nonballistic, near space, maneuver model, tracking filter

Recommended Citation

Qin Lei, Li Junlong. Maneuver Models Tracking Filter of Nonballistic Near Space Targets[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1380-1385.

临近空间目标非弹道式机动模式跟踪滤波技术

秦雷, 李君龙

(北京电子工程总体研究所, 北京 100854)

摘要: 由于临近空间高超声速飞行器采用非弹道式机动飞行方式, 飞行速度、高度、加速度不断变化, 目标机动具有长周期机动特点, 临近空间目标运动轨迹往往呈现出“跳跃”特征, 给地面防御系统对其定位和跟踪带来了巨大的困难, 传统的机动模式跟踪滤波技术无法给出精确的目标状态估计, 跟踪性能变差。通过对跟踪滤波方法进行概述, 介绍临近空间目标四种典型的非弹道式机动模式, 对不同机动模式跟踪滤波技术、机动模式未知情况下的跟踪滤波技术进行探讨, 为进一步提高临近空间高超声速飞行器跟踪滤波精度, 成功拦截临近空间高超声速飞行器提供保障。

关键词: 非弹道式; 临近空间; 机动模式; 跟踪滤波

中图分类号: TJ765.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 06-1380-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706030

Maneuver Models Tracking Filter of Nonballistic Near Space Targets

Qin Lei, Li Junlong

(Beijing Institute of Electronic System Engineering, Beijing 100854, China)

Abstract: Because hypersonic vehicles in the near space often adopt the way of nonballistic maneuver flight with characteristics of high speed and lift-to-drag ratio, flying in atmosphere for a long time, whose motion trajectories are sometimes characterized by “hopping”, their flight altitudes, flight velocities and flight accelerations change. Targets maneuver are characterized by long period maneuver, which has brought great difficulties with ground defense system for maneuvering target localization and tracking. Traditional filtering algorithms obviously cannot give accurate target state estimation, tracking performance has declined. The overview of tracking filter ways was given, introducing four typical nonballistic maneuver models of near space targets, and discussing from two aspects including tracking filter ways of different maneuver models and tracking filter ways of unknown maneuver models. The guarantee was provided for improving the accuracy of tracking filter for hypersonic vehicles in the near space and successfully intercepting hypersonic vehicles in the near space.

Keywords: nonballistic; near space; maneuver model; tracking filter

引言

随着美国近些年来发展临近空间进攻型武器力度不断加深, 引起了世界各国的广泛重视, 许多

国家相应开展了临近空间防御技术研究, 并已开始着手进行相关基础设施建设, 不断加深对防御技术探索力度。在临近空间防御体系中, 目前存在着许多技术问题, 例如非弹道式机动滤波等问题。其中非弹道式机动模式跟踪滤波技术作为拦截临近空间高超声速飞行器核心技术之一, 世界各国学者对其进行了广泛的研究。本文通过从介绍临近空间高超声速飞行器国外发展态势及其非弹道式机



收稿日期: 2016-06-27 修回日期: 2016-10-03;
作者简介: 秦雷(1987-), 男, 吉林, 博士, 研究方向为飞行器导航、制导与控制; 李君龙(1964-), 男, 辽宁, 博士, 研究员, 博导, 研究方向为飞行器导航、制导与控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1380 •

动模式, 临近空间目标非弹道式机动模式跟踪滤波技术以及展望与建议三个方面入手, 对临近空间目标非弹道式机动模式跟踪滤波技术概况进行了介绍, 以期对未来构建临近空间防御体系有借鉴意义。

1 临近空间高超声速飞行器国外发展态势及其非弹道式机动模式

1.1 临近空间高超声速飞行器国外发展态势

1.1.1 高超声速巡航导弹-X-51A

X-51A 即高超声速巡航导弹, 其巡航高度为 20~40 km, 巡航速度达 6~7 Ma。2013-05-01 进行了第四次飞行试验并取得了圆满成功, 2013 年底开展了高速打击导弹(HSSW)竞争研制, 预计 2017 年开展武器级试验, 2020 年形成初始作战能力。

1.1.2 高超声速滑翔弹头-HTV-2

HTV-2 即高超声速滑翔弹头, 其滑翔高度为 40~70 km, 滑翔速度为 12~15 Ma, 射程约为 16 000 km, 通过本土部署即可实现全球打击, 由于其技术研发难度较大, 预计在 2025 年左右形成初始作战能力。

1.1.3 AHW 首飞成功

AHW 计划是美国陆军提出研制一款用于实现常规全球快速打击计划的滑翔弹头, 可部署在关岛、印度洋迪戈加西亚和波多黎哥等地。其滑翔高度为 35~55 km, 滑翔段速度为 12~15 Ma, 射程约为 7 800 km, 技术研发难度较小, 预计在 2018-2022 年形成初始作战能力。

1.2 非弹道式机动模式概述

临近空间目标典型非弹道式机动模式主要包括以下 4 种: 1) 等高飞行, 横向机动最大; 2) 等动压飞行, 倾斜角为常数; 3) 最大升阻比飞行, 倾斜角为常数; 4) 常值攻角飞行, 倾斜角为常数。下面分别对以上 4 种机动模式进行介绍。

1.2.1 等高飞行, 横向机动最大($\gamma = \dot{\gamma} = 0, \alpha = \alpha_{\max}$)

该机动模式主要存在于目标巡航段, 可以使目

标横向机动能力达到最大, 最大限度提高目标机动能力, 对于规避敌方拦截起到至关重要的作用, 符合高超声速飞行器大范围机动特点。

1.2.2 等动压飞行, 倾斜角为常数($\rho V^2 / 2 = p_0, \sigma = c$)

该机动模式由于考虑到飞行器结构防热以及发动机工作条件要求, 一般在飞行上升段使用该模式。

1.2.3 最大升阻比飞行, 倾斜角为常数($\eta = \eta_{\max}, \sigma = c$)

该模式主要用于飞行巡航段和滑翔段, 以使高超声速飞行器达到射程最远, 机动能力最强。

1.2.4 常值攻角飞行, 倾斜角为常数($\alpha = c, \sigma = c$)

该模式主要用于飞行巡航段, 一般在距离敌方目标较远的位置飞行、不需要考虑规避敌方拦截时可以采用该模式。

2 临近空间目标非弹道式机动模式跟踪滤波技术

2.1 跟踪滤波技术概述

由于临近空间高超声速飞行器采用非弹道式机动飞行方式, 使用传统滤波估计方法和跟踪方式难以对飞行器弹道实现准确的跟踪和轨迹预报, 因此存在非弹道式目标加速度估计与轨迹跟踪预报难的问题。各国学者在该领域进行了较为深入的探讨和研究。研究发现一种叫做交互式多模型算法(Interacting Multiple Model Algorithm, IMM)^[1], 适合于处理临近空间飞行器目标跟踪问题。

Blom 和 Bar-Shalom 提出的交互式多模型算法是多模型算法中最有效的方法之一, 它被用来克服动力学系统参数和状态的不确定性。该算法未来的研究方向是在不降低精度的情况下如何减少交互式多模型的数量, 尤其在带有协调转弯模型的交互式多模型跟踪问题中更为显著。解决方法可以利用对不确定区域离散化, 从而确定出交互式多模型的数量, 估计精度以及要求的计算量。

目前机动目标模型包括匀速直线运动模型(CV)、匀加速直线运动模型(CA)、匀速圆周运动模型(CT)、Singer 模型、半马尔科夫模型、Jerk 模型、机动目标“当前”统计模型等。国内用的比较多的是周宏仁教授提出的机动目标“当前”统计(Current Statistical, CS)模型。交互式多模型算法是少有的几种在不同运动模式转换过程中能够克服模型改变问题,能够准确从一个模型转换到另一个模型的算法。在不确定目标运动状态情况下,通过交互式多模型算法可以仿真出哪种模型使用概率更高,则该模型更加接近真实运动轨迹,可以判断出该时刻目标处于哪种运动状态。该算法目前已经广泛应用于弹道预报、预测目标飞行器未来运动轨迹等领域,并且产生了很好的滤波估计效果。

交互式多模型算法存在以下问题:为了提高状态估计性能需要更多的模型匹配目标运动,但增加的模型不但会大大增加系统运算量外,甚至很多情况下也有可能降低跟踪器的性能。另外,对于弱机动或非机动目标采用 IMM 算法会造成资源的浪费。针对这些问题,采用的改进方法通常有模糊 IMM 算法,变结构 IMM 算法以及交互式多模型固定延迟平滑算法等。

模糊 IMM 算法(FIMM)^[2-4]通过从机动性能角度出发使用最小数量的子模型,使用模式概率作为模糊输入来调整模式转换概率。该算法占用更少的计算资源,主要有以下优点:其一,直接使用了简化的模糊推理方法;其二,不必调整模糊输入因为模式概率是归一化值,设计模糊元素时候容易使用专家知识,例如模糊划分,模糊规则。仿真表明,通过调整模式转移概率,使用模型概率作为模糊输入,模糊交互式多模型算法在机动目标跟踪方面是十分有效的。

为了克服固定结构交互式多模型算法的弱点,近 10 年来,许多学者转向了研究变结构交互式多模型算法^[5],在文献[6-7]中得到发展。基本思想是:在变结构交互式多模型算法中,由于不需要同时用到所有模型,所以减少了计算量。变结构交互式多

模型算法包含交互式多模型循环,基于模型滤波(卡尔曼滤波),目标模型组转换逻辑(MGS)。目标模型组转换逻辑包含激活逻辑和终止逻辑,该算法有能力处理自适应时变模型集合,包括在任何条件下实现目标跟踪的各种目标模型。

文献[8-10]在 IMM 算法的基础上,结合变结构思想,提出了一种自适应网格交互式多模型的跟踪算法。通过仿真表明,AGIMM 算法,即利用较少目标运动模型的 IMM 算法与固定结构的 IMM 机动目标跟踪算法相比,不仅减少了计算量,而且有更好的滤波估计精度和更好的性能。

文献[11]将 IMM 算法与固定延迟平滑算法结合在一起,形成基于马尔科夫转换系统的交互式多模型固定延迟平滑算法,它是一种次优算法。通过一个包含原始系统当前状态和延迟状态的状态扩展系统将原始系统的滤波和平滑算法整合在一起,由固定延迟模式概率得出当前时间的量测量,通过一种简单而且有效的方法进行了近似。利用该算法对文献[12]中例子进行了仿真。仿真结果表明,交互式多模型固定延迟平滑算法滤波估计精度好于交互式多模型滤波算法。

总的来说,IMM 算法是一种性能良好、效率高的机动目标跟踪算法,将有限的目标运动模型结合在一起,共同描述目标的运动规律,且不需要机动检测。缺点是运算量庞大,需要多个模型同时并行计算。

IMM 各模型滤波算法通常采用卡尔曼滤波或扩展卡尔曼滤波算法,如果系统模型为高度非线性模型,必定使得滤波性能大大降低。文献[13-15]提出将粒子滤波与无迹卡尔曼滤波结合在一起,形成无迹粒子滤波算法。再结合 IMM 算法,可以很好的解决单纯使用 UPF 算法计算效率较低、计算成本较高、滤波估计性能差的问题,对于高度非线性模型有很好的滤波效果。文献[16-17]提出将 IMM 算法与粒子滤波算法结合起来,从仿真结果来看该算法很好的解决了非线性,非高斯问题,相比于 IMM 算法能够更好的跟踪机动目标,跟踪性能进一步提高。

2.2 不同机动模式跟踪滤波技术

在机动目标跟踪问题中, 为了获取机动目标的运动参数, 就必须运用量测手段测量机动目标的运动状态。但是, 量测值不仅有系统的状态参数, 还包含有量测噪声。如何从受噪声污染的量测值中恢复信号或逼近信号, 解决这一问题的办法就是最优估计。在滤波理论和方法发展的二百多年历史中, 大批学者进行了不懈努力, 建立和发展了许多有特色的、实用的滤波理论和基本方法, 其中高斯、维纳、卡尔曼等人作出了重大贡献。针对目标当前和未来时刻的运动状态, 基于不同的数学统计和数学处理方法, 提出和创建的各种经典滤波和预测的基本方法主要有:

1. 线性滤波方法

首先介绍几种基本的线性跟踪滤波方法, 这些方法是跟踪系统的最基本要素, 也是形成自适应跟踪滤波的前提和基础。

(1) 1960 年由卡尔曼(R.E.Kalman)提出的卡尔曼滤波^[18]很好的解决上述问题, 它是一种基于线性最小方差估计的离散数据线性滤波问题的递归算法, 该方法将动态线性系统建模为离散数据系统, 并采用求得的状态变量来解决维纳滤波问题。

(2) α - β 与 α - β - γ 滤波在卡尔曼滤波中增益的计算占了大部分的工作量, 为了减少计算量, 可以改变增益矩阵的计算方法, 为此人们提出了常增益滤波器, 这里的增益可以离线计算, 这样就大大减少了计算量。 α - β 滤波器是针对匀速运动模型的一种常增益滤波器, 而 α - β - γ 滤波器则是针对匀加速运动模型的一种常增益滤波器。

2. 非线性滤波方法

在实际的目标跟踪系统中, 很少有系统是完全线性的。以下给出几种常用的非线性滤波方法。

(1) 扩展卡尔曼滤波(EKF)^[19]对于非线性滤波问题, 通常将非线性问题做线性化处理, 转化为近似的线性滤波问题。EKF 被广泛用于解决非线性系统的状态估计问题, 但是被估计对象的非线性越强, 引起的估计误差越大, 甚至导致滤波发散。

(2) 不敏卡尔曼滤波(UKF)UKF 算法^[20]根据被估计量和量测量的协方差阵来确定最佳增益阵, 协方差阵根据复现的一倍 σ 样本点来计算, 这些样本点根据系统方程和量测方程来确定。由于该算法未对系统方程和量测方程提出任何附加条件, 算法既适用于线性对象, 也适用于非线性对象。

(3) 粒子滤波(Particle Filter, PF)粒子滤波算法使用生成的随机样本来近似后验函数, 它是一种十分有效的解决非线性和非高斯问题的方法^[21]。粒子滤波算法中的主要思想是用一组带权重的随机样本代表要求的后验密度函数, 计算基于这些样本和权重的估计。随着 k 值的增加, 一些粒子的权重会接近于零, 另外一些粒子的权重会接近于 1。为了避免这个问题, 需要根据粒子的权重进行二次采样。换句话说, 更高权重可以得出更多样本, 但是更小权重只能得出更少的样本。在二次采样以后, 所有粒子被设置为相同权重。

3. 自适应滤波算法

自适应滤波算法概括起来可分为三类: 检测自适应滤波, 实时辨识自适应滤波和“全面”自适应滤波。

(1) 检测自适应滤波^[22]

检测自适应滤波的基本思想是: 当目标发生机动时使得原来的模型变差, 从而造成目标状态估计偏离真实状态, 滤波残差特性发生变化, 因此可以通过观测目标运动的残差变化来探测目标是否发生机动或机动结束, 然后进行噪声方差调整或模型转换, 以便更好地跟踪目标。

1982 年 Bar-Shalom 和 Birmiwal 提出了变维滤波算法。该方法不依赖于目标机动的先验假设, 把机动看做目标动态特性的内部变化。检测手段采用平均新息法, 调整方式采用“开关”型转换, 在没有机动时采用原模型, 一旦检测到机动使用不同的、具有较高维数的状态量测, 附加上新的状态分量, 并转换到原来的模型。该算法优点是有较好的机动目标跟踪适应能力, 缺点是当改变到机动模型时, 必须完全重建滑动窗口内状态变量的估计。

周东华等人提出了强跟踪滤波算法^[23]。强跟踪滤波算法是指对于突变状态、缓变状态都有很强的跟踪能力,对于模型不确定性具有鲁棒性的一种滤波算法。但是该算法针对测量过程中的不确定性没有很好的适应性,容易造成滤波估计精度下降。

(2) 实时辨识自适应滤波

实时辨识自适应滤波^[24]是指在线辨识出机动加速度或其统计特性(如机动噪声方差和均值等)。机动目标“当前”统计模型自适应跟踪算法是一种典型的实时辨识自适应滤波方法,该算法在估计目标状态的同时,还可辨识出机动加速度均值,从而实时地修正加速度分布,并通过方差反馈到下一时刻的滤波增益中,实现闭环自适应跟踪。

(3) “全面”自适应滤波

上述两类方法各有其优缺点,自然产生了两类方法综合发展的趋势,形成了“全面”自适应滤波算法。交互式多模型算法就是其中一种典型的方法。

2.3 机动模式未知情况下的跟踪滤波技术

当机动模式未知情况下,由于交互式多模型算法中的机动目标模型可以涵盖所有临近空间非弹道式目标机动模式,使用该算法可以提高目标跟踪精度,减少目标跟踪误差,但是使用单一目标模型时会增加跟踪误差,跟踪效果变差。因此在机动模式未知的情况下考虑使用交互式多模型算法相比于其他算法精度更高,工程实用性更强。

3 结论

本文研究了临近空间高超声速飞行器非弹道式机动模式跟踪滤波技术,分别从临近空间高超声速飞行器国外发展态势,四种典型的临近空间高超声速飞行器非弹道式机动模式,不同机动模式的跟踪滤波技术以及机动模式未知情况下的跟踪滤波技术4个方面分别进行了介绍。通过对交互式多模型算法进行的论述,得出交互式多模型算法有着非常广阔的研究前景,相比于单一机动模型滤波器来说,会较大程度提高跟踪滤波精度,实现对临近空间飞行器非弹道式机动模式高精度跟踪的目的,为

弹道预报、预估下一时刻目标所在位置、速度、加速度提供有力保障。

参考文献:

- [1] 李为, 李一平, 封锡盛. 基于修正加权矩阵的三维解耦无偏量测转换交互式多模型算法 [J]. 机器人, 2015, 37(2): 237-253. (Li Wei, Li Yiping, Feng Xisheng. A Decoupled Interacting Multiple Model Algorithm with Unbiased 3D Converted Measurements Based on Modified Weighted Matrix [J]. Robot, 2015, 37(2): 237-253.)
- [2] 张园, 郭晨, 刘淑波, 等. 基于S修正卡尔曼滤波的自适应网格模糊交互多模型算法研究 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(3): 13-18. (Zhang Yuan, Guo Chen, Liu Shu-bo, et al. Research on algorithm of adaptive grid and fuzzy interacting multiple model based on S-amended kalman filter [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(3): 13-18.)
- [3] 刘瑞兰, 陈小惠. 基于模糊交互多模型的机动目标被动跟踪算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(10): 846-850. (Liu Ruilan, Chen Xiaohui. Maneuvering target tracking algorithm based on fuzzy interacting multiple model [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(10): 846-850.)
- [4] 张宇. 一种图像确认目标的多目标跟踪方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 617-624. (Zhang Yu. Image confirmed multi-target tracking algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(6): 617-624.)
- [5] 梁建波, 王芳, 方喜龙, 等. 拦截弹状态变结构交互多模滤波估计方法 [J]. 电光与控制, 2011, 18(7): 68-85. (Liang Jianbo, Wang Fang, Fang Xilong, et al. A VSIMM Algorithm for State Estimation of Interceptor [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 68-85.)
- [6] 张园, 董受全, 钟志通, 等. 防发散无迹卡尔曼滤波自适应网格交互式多模型算法 [J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(2): 40-44. (Zhang Yuan, Dong Shou-quan, Liu Shu-bo, et al. Adaptive Grid Interacting Multiple Model Algorithm Based on Anti-divergent UKF [J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(2): 40-44.)
- [7] 毛征, 孟凡刚, 孟灿, 等. 基于高机动目标跟踪的改进变结构 IMM 算法 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(3): 353-360. (Mao Zheng, Meng Fan-gang, Meng Can, et al. Improved Variable-structure IMM Algorithm Research Based on High Maneuvering Targets Tracking [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(3): 353-360.)
- [8] 陈海, 单甘霖, 吉兵, 等. 图像增强的自适应网格交互式多模型算法 [J]. 电光与控制, 2012, 19(8): 28-33.

- (Chen Hai, Shan Ganlin, Ji Bing, et al. Image Enhanced Adaptive Grid Interacting Multiple Model Algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(8): 28-33.)
- [9] 王硕, 刘丽. 基于机动转弯目标的自适应交互式多模型算法 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 169-193. (Wang Shuo, Liu Li. Adaptive Interacting Multiple Model Algorithm Based on Turn Maneuver Targets [J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 169-193.)
- [10] Semerdjiev E, Mihaylova L, Li X-R. Variable- and fixed-structure augmented IMM algorithms using coordinated turn model [C]// Proceedings of International Conference on Information Fusion (Fusion 2000). Paris, France: IEEE, 2000: 25-32.
- [11] H A P Blom, Y Bar-Shalom. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients [J]. IEEE Trans. Automatic Control (S0018-9286), 1988, AC-33(8): 780-783.
- [12] R E Helmick, W D Blair, S A Hoffman. Fixed-interval smoothing for Markovian switching systems [J]. IEEE Trans. Information Theory (S0018-9448), 1995, IT-41(11): 1845-1855.
- [13] X Zhang, W Hu, Z Zhao, et al. SVD Based Kalman Particle Filter for Robust Visual Tracking [C]// Proc. IEEE Conference on Pattern Recognition. USA: IEEE, 2008: 1-4.
- [14] J Li, H Yu, L Zhou, et al. An Adaptive Unscented Particle Filter tracking Algorithm Based on Color Distribution and Wavelength Moment [C]// Proc. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. USA: IEEE, 2007: 2218-2223.
- [15] C Kim, R Sakthivel, W K Chung. Unscented FastSlam: A Robust Algorithm for the Simultaneous Localization and Mapping Problem [C]// Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 2007: 2439-2445.
- [16] Gordon N J, Salmond D J, Smith A F M. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation [C]// IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing. USA: IEEE, 1993: 107-113.
- [17] Yang N, Tian W, Jin Z. An interacting multiple model particle filter for manoeuvring target location [J]. Measurement Science and Technology (S2157-1473), 2006, 17(6): 1307-1311.
- [18] 党建武, 黄建国. 机动目标自适应高斯模型与跟踪算法 [J]. 电讯技术, 2003(2): 109-113. (Dang Jian-wu, Huang Jian-guo. An Adaptive Gauss Model and Tracking Algorithm for Maneuvering Target [J]. Telecommunication Engineering, 2003(2): 109-113.)
- [19] D T Magill. Optimal Adaptive Estimation of Sampled Stochastic Processes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 1965, 10(4): 434-439.
- [20] Simon Haykin. Kalman Filtering and Neural Networks [M]. USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [21] Doucet A, de Freitas N, Gordon N. Sequential Monte Carlo Methods in practice [M]. New York, USA: Springer-Verlay, 2001.
- [22] Young P. Self-adaptive Kalman filter [J]. Electronics Letters (S0013-5194), 1979, 15(12): 358-360.
- [23] Wang D, Zhou D H, Jin Y H. A strong tracking predictor for nonlinear processes with input time delay [J]. Computers and Chemical Engineering (S0098-1354), 2004, 18(12): 2523-2540.
- [24] R L Moose. An adaptive state estimation solution to the maneuvering target problem [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 1975, 20(6): 359-362.

(上接第 1379 页)

- [3] R L 米切尔. 雷达系统模拟 [M]. 陈训达译. 北京: 科学出版社, 1985. (Mitchell R L. Simulation of radar system [M]. Chen Xunda translated. Beijing, China: Science Press, 1985.)
- [4] 王国玉, 汪连栋, 王国良, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 48-55. (Wang Guoyu, Wang Liandong, Wang Guoliang, et al. Mathematical simulation and evaluation of radar electronic warfare system [M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2004: 48-55.)
- [5] 郑娇. 雷达系统多分辨率建模与仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013. (Zheng Jiao. Multiresolution modeling and simulation of radar system [D]. Xi'an, China: Xidian University, 2013.)
- [6] 李莹. 雷达系统多粒度建模与仿真 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. (Li Ying. Multi-granularity modeling and simulation of radar systems [D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [7] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理 [M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2009: 294-295. (Ding Lufei, Geng Fulu, Chen Jianchun. Radar principle [M]. 4th edition. Beijing, China: Electronic Industry Press, 2009: 294-295.)
- [8] 徐喜安. 单脉冲雷达系统的建模与仿真研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006. (Xu Xi-an. Modeling and simulation of single pulse radar system [D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)