

临空高超声速飞行器多传感器协同探测体系

孙 文, 王 刚, 郭相科, 王晶晶

(空军工程大学防空反导学院,西安,710051)

摘要 针对单平台难以临空高超声速飞行器进行全程连续探测、稳定跟踪的问题,构建了基于多平台多传感器协同探测跟踪体系。通过对临空高超声速飞行器作战特性、探测需求的详细分析,提出了由天基、临空基、空基和地/还基平台组成的天临空地/海多平台协同探测体系,重点分析了体系结构和探测时序及过程;搭建了天临空地/海协同探测仿真平台,通过 STK 对平台静态部署和动目标检测的效果进行了仿真分析。仿真结果验证了天临空地/海多平台协同探测体系在探测空域、时效性等方面具有较大优势,能够有效弥补单平台的不足,为未来探测跟踪此类目标提供了技术支撑。

关键词 临空高超声速飞行器;探测需求;天临空地/海协同探测;STK

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.010

中图分类号 TP212.9 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)06-0052-06

An Analysis of the Cooperative Detection Mechanism on NSHV

SUN Wen, WANG Gang, GUO Xiangke, WANG Jingjing

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problem that a single-platform is hard to perform the continuous detection and stable tracking of near space hypersonic vehicle, a cooperative detection and tracking model is structured based on multi-platform. The space-near space-air-ground/sea cooperative detection system is put forward, the construction, time scheme and detection process are analyzed according to analysis of the combat characteristics and detection demands of NSHV. The cooperative detection platform is built up, and the static deploying and dynamic target detecting effect are analyzed by STK. The advantages of detection range and timeliness are verified with the simulation results, and these advantages make up the weakness of the single platform effectively. This will supply detecting and tracking this target in the future with an important technology foundation.

Key words: near space hypersonic vehicle; detection demand; space-near space-air-ground/sea cooperative detection; STK

临空高超声速飞行器(Near Space Hypersonic Vehicle, NSHV)是指飞行速度在 $5\sim 25Ma$, 飞行高度在 $20\sim 100\text{ km}$, 执行战略威慑、作战攻击等特

定任务的飞行器,具有空域高、速度快、机动性强和隐身性好等特点^[1-2],相比于传统目标,其作战空间更广、作战节奏更快、突防能力更强,对现役的防空

收稿日期:2016-04-13

基金项目:国家自然科学基金(612742011;61102109)

作者简介:孙 文(1992-),男,山东青州人,硕士生,主要从事临空高超声速飞行器多传感器探测跟踪研究.E-mail:sunw_88888@163.com

引用格式: 孙文,王刚,郭相科,等. 临空高超声速飞行器多传感器协同探测体系[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(6):52-57.SUN Wen, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. An Analysis of the Cooperative Detection Mechanism on NSHV[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(6): 52-57.

反导体系,特别是探测预警系统构成了极大的挑战^[3]。现役的探测预警系统对 NSHV 的全程连续不间断探测跟踪能力有限,在探测跟踪精度、信息传输流程等方面也存在一定不足^[4-5],难以满足全球覆盖全天候监视的需求。

为了达到攻防体系对抗的平衡,军事大国在大力研制 NSHV 的同时,也在积极探索和发展针对高速高空目标的探测跟踪系统^[6],主要的手段有新探测资源的补充、现役探测资源硬件和软件的升级以及协同组网的优化。目前,关于协同组网的研究已经取得了一定成果,文献^[7]主要论述了建立高效合理的探测网络对探测高速目标的必要性;文献^[8]介绍了信息共享条件下多传感器的优化组网对探测概率的重要性;文献^[9]主要介绍了多传感器协同组网对探测时敏目标的优越性,可见协同组网对探测跟踪具有至关重要的作用。针对单平台对 NSHV 在探测空域、时效性方面的局限性以及在探测精度和距离上的不足,本文在现有研究的基础上,提出了基于天基、临空基、空基和地基探测平台组成的天临空地/海协同探测体系。

1 NSHV 协同探测需求

1.1 作战特性分析

以空天飞机、高超声速巡航导弹和高超声速无人飞行器为代表的临空高超声速飞行器,相对于作战飞机和弹道目标而言,在机动性能、飞行速度、隐身能力和攻击范围等方面具有较大优势。3 种类型的临空高超声速飞行器典型代表分别为 X-37B、X-51A 和 HTV-2,其试验飞行作战过程见图 1。结合典型 NSHV 的试验作战过程,从以下几个方面进行作战特性分析。

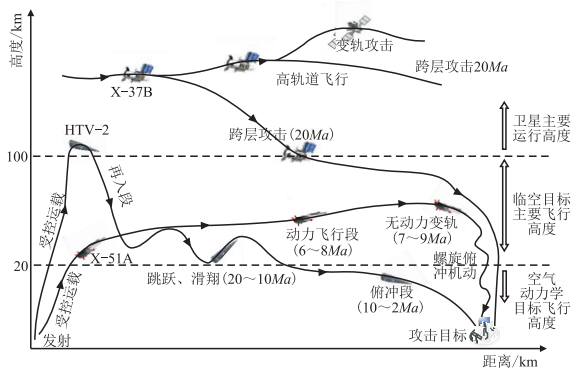


图 1 典型 NSHV 作战过程

Fig.1 Typical NSHV combat process

1) 飞行速度快,任务完成时间短。X-37B 速度最高可达 25Ma,是普通作战飞机速度的 6~12 倍,

具有“来无影,去无踪”的特点;X-51A 具有乘波体机构,配备超燃冲压发动机,巡航速度 6~8Ma^[10];HTV-2 在跳跃滑翔段的速度能够达到 10~20Ma,而空气动力学目标的速度主要在 0~3Ma。NSHV 的飞行速度快,可在短时间内完成作战任务,大幅压缩“杀伤链”的时间,使得防御体系难以及时应对。

2) 机动性能强,生存能力高。NSHV 能够进行变轨跨层、螺旋俯冲、横纵向机动等^[11],其中 HTV-2 的横向机动距离能够达到 5 500 km,具有极强的生存能力,现有的探测跟踪系统获取的信息,不能为拦截制导提供有效依据。

3) 隐身能力好,截获跟踪概率小。NSHV 凭借其优越的外形结构和隐身材料,使其 RCS 可以达到 0.01 m²,甚至更小,结合其高速、机动等特性,依靠单一传感器平台或者传感器类型只能在某一阶段或者某一时刻对目标进行探测发现,难以对其进行连续探测稳定跟踪。

NSHV 在速度、时间和空域上的优势,对空间目标监视系统、预警探测系统以及防空反导武器系统带来了极大地挑战,使得“看”“跟”“认”“打”作战闭环过程难以顺利构成。

1.2 探测需求

NSHV 对战场时空的巨大压缩效应,颠覆了现代战争中的时间、空间概念,大大超出了防御体系的作战能力,为有效应对 NSHV 高空、高速、高隐身和强机动等特性给防御体系带来的挑战^[12],首先需要解决的就是“看”和“跟”,即对目标进行连续探测和稳定跟踪。其需求主要有以下几方面:

1) 多平台协同探测跟踪能力需求。通过将天基、临空基、空基和地基探测平台部署在不同的空域,形成一个立体、无缝探测空域,实现对 NSHV 助推段、再入段、滑翔段等不同飞行阶段的探测跟踪,借助通信系统共享各个平台的探测信息,共同完成对 NSHV 飞行全过程的探测跟踪,各平台之间相互引导、相互印证,为拦截制导提供依据。

2) 多类型传感器协同探测能力需求。NSHV 在临空环境中高速飞行时,除了具有电磁特性外,还具有尾焰、等离子鞘套、蒙皮辐射等产生的红外特性^[13-14],通过将雷达、红外、紫外、可见光等传感器相互配合使用,可以获得目标较为完整的速度信息、位置信息和角度信息等。各类传感器的相互配合协同使用,成为相互独立又相互补充的探测跟踪手段,能够获得目标较为完整的各类参数信息

3) 性能指标需求。NSHV 具有多种发射方式,可以机载发射、变轨运行等^[15],发射地点、发射空域具有不确定性,所以需要协同探测体系能够进行全

球覆盖;由于 NSHV 发射时间的随机性和无法预知性,需要协同探测体系对全球进行 24 h 不间断监视预警,同时,目标飞行速度极快、机动性强,要求探测体系还应具有快速响应能力和信息处理能力。

2 多平台多传感器协同探测体系

为了适应目标的作战特性,提升快速响应能力,满足全球覆盖、全程探测的需求,从探测平台、任务载荷等方面出发^[16-17],构建由天基、临空基、空基、地(海)基探测预警系统组成的一体化、全方位、多层次的天临空地/海协同探测体系,实现目标的协同探测、跟踪和指示。

2.1 体系结构

体系结构主要以天基、临空基、空基、地(海)基平台以及所属的雷达、红外等传感器为主,同时为有效实现任务规划、信息共享和探测引导等,还需要指

示系统处理中心以及各级指控中心和任务处理节点等。其中,指示系统处理中心根据作战任务和任务规划,向天基、临近空间、空基任务处理节点下达作战授权、综合情报、支援任务,也可直接向预警跟踪装备下达截获引导任务;处理节点根据综合情报,完成任务规划,并根据任务规划完成对所属的预警跟踪装备的截获引导,同时,也可根据授权对其他装备下达截获引导指令。

其中,GEO 的覆盖区是地球表面的 1/3 左右,至少用 3 颗 GEO 可完成对全球的覆盖;HEO 对高南北纬度地区进行探测,至少需要 2 颗 HEO 完成对两极的补盲探测;LEO 高度低于 2 000 km,周期在 90 min~2 h 之间^[18],在地平面出现的最长时间是 20 min,需要配置大量的 LEO 在不同的轨道面上,才能完成对目标的有效探测;临空基、空基和地(海)基探测资源的数量具有不确定性^[19],得到各个平台探测装备的类型、数量、载荷以及任务情况见表 1。

表 1 天临空地/海探测体系配置方案

Tab.1 The configuration scheme of space-near space-air-ground(sea) cooperative system

平台	载荷	任务
高轨卫星	GEO	紫外、短波/中波红外
	HEO	短波/中波红外
低轨卫星	LEO	中波/长波红外、可见光、雷达
临空基平台	浮空气球	中波/长波红外、雷达
	飞艇	
空基平台(预警机、无人机)	红外、雷达	高精度探测跟踪目标
地(海)基平台	远程预警雷达	远程预警探测
	跟踪制导雷达	S/X 波段

2.2 探测时序及过程分析

各平台探测资源具有分布性、实时性和动态性的特点^[20],其协同探测过程是一项复杂的系统工程,目前,对 NSHV 在具体作战中的协同探测时序流程的研究还没有较为成熟的结论,主要依据其飞行过程和飞行空域等信息,在对空气动力学目标和弹道目标协同探测时序流程的基础上进行补充完善,得到整体及各平台协同探测的时序。

以 HTV-2 的试验飞行情况为例,按照不同空域,不同阶段的飞行情况,按照多平台协同探测时序,得到的假定协同探测过程见图 2。

由图分析可知,天临空地/海协同探测采用分阶段、分层次协同探测的方式,在助推段,GEO 在短波、中波红外段或紫外段发现目标,若目标飞行纬度较高则需要 HEO 辅助对两极进行补盲探测;在姿态调整的再入段,通过 GEO 对目标的持续跟踪,天基任务处理节点根据 GEO/HEO 的探测信息,引导

LEO 发现目标;在跳跃滑翔段,临空基和空基任务处理节点根据 LEO 的探测信息,引导探测平台对目标进行高精度的探测;在末段攻击段,主要是地(海)基平台依据指示系统处理中心的综合信息调整波束进行探测跟踪,引导拦截武器打击目标。

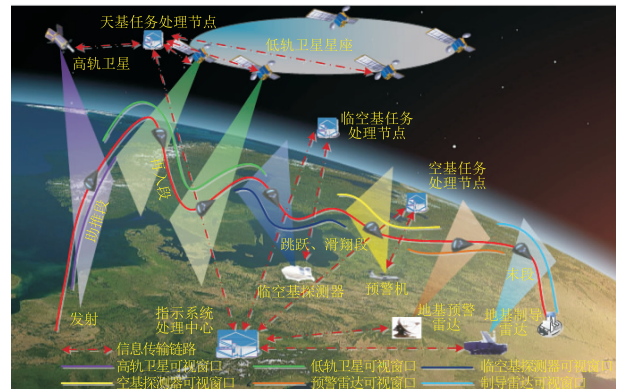


图 2 天临空地/海平台协同探测过程

Fig.2 the cooperative detecting process of space-near space-air-ground(sea) platform

3 协同探测仿真分析

主要通过卫星工具包(STK)进行仿真平台的静态部署和动目标检测,STK 能够建立陆、海、空、天各种场景、分析多种任务,可以实现多平台协同探测 NSHV 的定性定量分析。

3.1 各平台的部署

依据体系结构的分析,假定部署 4 颗 GEO、2 颗 HEO、12 颗 LEO、3 个临空基探测器、3 个空基探测器和 6 部地基雷达进行仿真平台的搭建。GEO 距离地面 36 000 km,按经度均匀分布,实现从 80°S~80°N 的覆盖,搭载扫描型和凝视型两种探测器,扫描型探测器视场为 10°×20°,扫描周期 9 s,凝视型探测器视场 0.5°×0.5°,扫描周期 2 s;HEO 轨道倾角 63.4°,近地点 600 km,远地点 50 000 km,覆盖时间 14 h,搭载双色 2.7 um、4.3 um 高速扫描型探测器和与之互补的高分辨率凝视型探测器,主要负责两极地区的监视预警,可在 10~20 s 之间将预警信息传送给地面;LEO 分布在 3 个轨道平面上,距离地面 1 600 km,回归周期 90 min,搭载宽视场短波红外捕获探测器和窄视场凝视型多色(中波、中长波和长波红外及可见光)跟踪探测器;临空基探测器距离地面 20 km 左右,在太平洋地区机动配置,探测距离 1 900 km;空基探测平台距离地面 3~8 km,机动配置,探测距离 1 500 km;地基雷达有 P/X/L 波段,固定部署。探测平台部署情况见图 3。

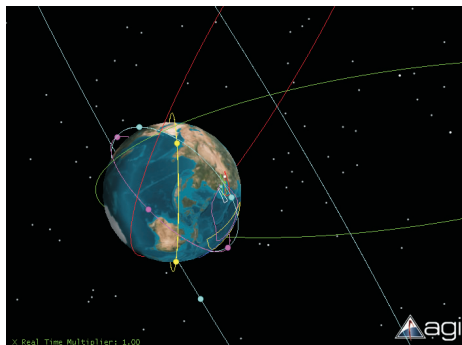


图 3 各平台部署情况

Fig.3 Each deployment platform

3.2 覆盖效果分析

根据各个平台数量的不同、搭载传感器类型和能力的差异以及部署的位置地点情况,通过仿真平台,得到多平台的静态覆盖层数、动态覆盖层数、全球覆盖率和时间覆盖率,分别见图 4~7。

由图可知,多平台的协同部署探测可以满足全球进行覆盖的探测需求,同时能够对 80°S~80°N 区域进行全天候不间断监视,对重点地区的平均覆盖

层数为 3 层,保证了对 NSHV 关键阶段的探测跟踪以及对武器系统的拦截制导。

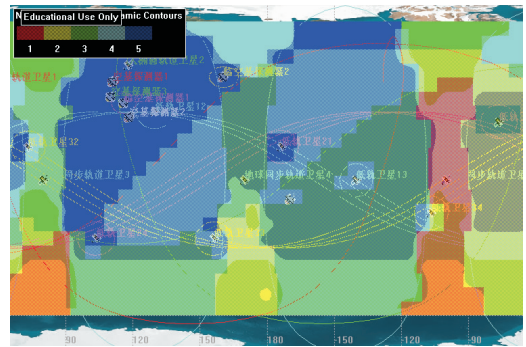


图 4 静态覆盖层数

Fig.4 Static covering layer

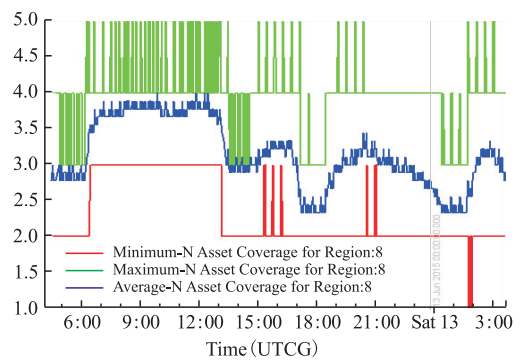


图 5 动态覆盖层数

Fig.5 Dynamic covering layer

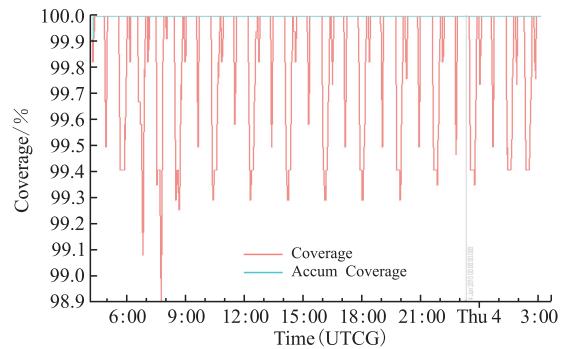


图 6 全球覆盖率

Fig.6 Global coverage

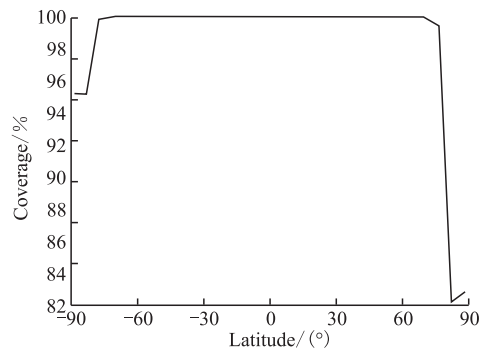


图 7 时间覆盖率

Fig.7 Time coverage

3.3 动目标探测效果分析

假定,NSHV从A点(38°N,80°W)发射攻击B点(40°N,120°E),航行距离约12 000 km,横跨太平洋,X-51A发射高度12 km,发射速度5Ma,巡航速度6~8Ma;HTV-2跳跃滑翔段速度12~16Ma,俯冲攻击速度6~8Ma。主要分单目标和多目标2种情况进行探测效果分析,各平台按照最优策略原则调度各自探测资源。其飞行轨迹和协同探测效果见图8~9。

由图可知,对单目标而言,在初始段主要由大椭圆轨道卫星和地球静止轨道卫星探测,在飞行的滑翔机动段,主要由低轨卫星、临空基和空基探测器进行探测跟踪,在4:11~4:19达到三重探测,在末段主要是依靠地基雷达进行探测跟踪,能够实现对单目标的全程连续探测;对多目标而言,协同探测可以实现对目标的全程覆盖,对重点区域能够达到三重探测,协同探测效能见表2。

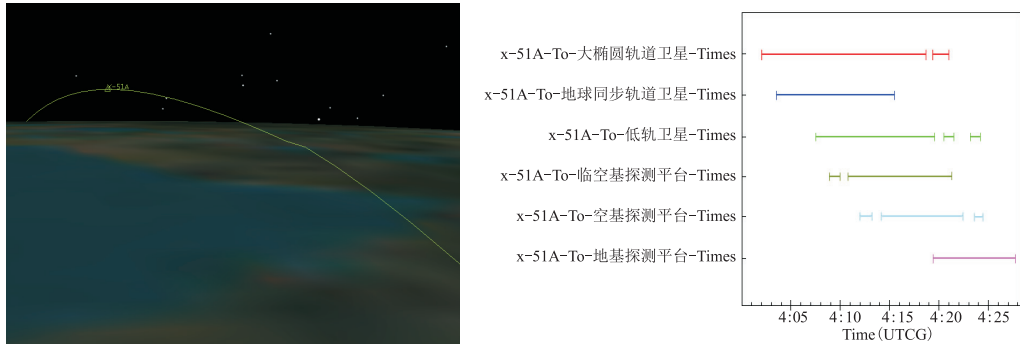


图8 X-51A飞行轨迹及协同探测效果

Fig.8 The flight path and cooperative detecting effect of X-51A

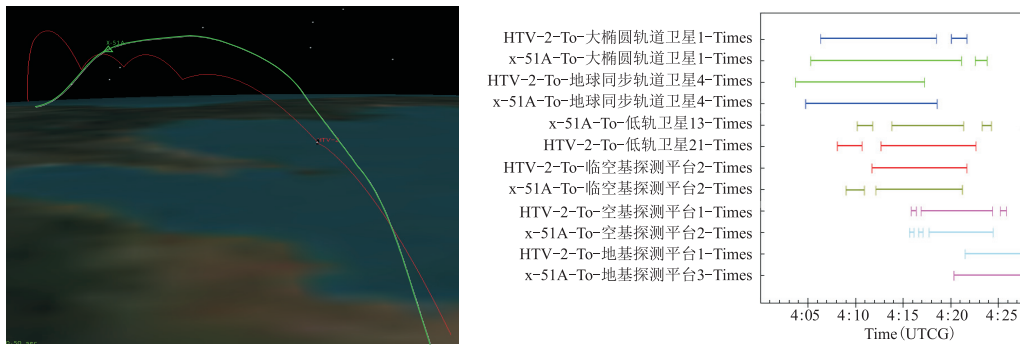


图9 HTV-2和X-51A的飞行轨迹及协同探测效果

Fig.9 The flight path and cooperative detecting effect of HTV-2 and X-51A

表2 多平台协同探测效能

Tab.2 The cooperative detecting efficiency of multi-platform

要素	X-51A	HTV-2和X-51A
首次发现时间	04:02:15	04:03:1(HTV-2) 04:04:53(X-51A)
航迹探测时间	1 526 s	1 461 s(HTV-2) 1 367 s(X-51A)
全程探测覆盖率	>90%	>85%
可视窗口	满足跟踪引导	满足跟踪引导
动态覆盖层数	2~4层	2~3层
平均更新时间	2 s	2 s
资源配置效能	低轨卫星>2	低轨卫星>2
丢失目标重新跟踪能力	强	较强
传感器平均探测次数	2次	2次

由表2分析可知,多平台对单目标和多目标的协同探测效果均较为理想,从航迹探测时间、全程覆

盖率和平均更新时间上看,可以保证对NSHV全程探测的连续性和实效性;在动态覆盖层数和资源配置上,满足定位跟踪的要求;传感器的整体性能大于单个传感器性能的简单相加,具有时间同步、空间连续的特点。

通过仿真分析可知,天临空地/海协同探测体系在未来探测NSHV的过程中,能够满足全球覆盖的要求,保证探测时间的连续,提高全程探测的精度,弥补天地协同探测的不足,实现全程连续稳定地探测跟踪。

4 结语

针对单平台在探测空域、时域、精度等方面的局限性,本文提出了临空高超声速飞行器多传感器协

同探测体系,该体系涵盖了天、临空、地、海多个平台,多种异质、异类传感器,以探测需求为牵引,对其时序流程及协同过程进行了重点分析。通过仿真实验,表明天临空地/海协同探测体系能够有效弥补单平台探测体系的不足,具有较高可行性和合理性。

参考文献(References):

- [1] 李淑艳,任利霞,宋秋贵,等. 临近空间高超音速武器防御综述[J]. 现代雷达, 2014, 36(6):13-15.
LI Shuyan, REN Lixia, SONG Qiugui, et al. Overview of Anti-Hypersonic Weapon in Near Space[J]. Modern Radar, 2014, 36(6):13-15. (in Chinese)
- [2] CHEN M, WU Q X, JIANG C S, et al. Guaranteed Transient Performance Based Control with Input Saturation for Near Space Vehicles [J]. Information Sciences, 2014, 57(4):1-12.
- [3] 汪连栋,曾勇虎,高磊,等. 临近空间高超声速目标雷达探测现状与趋势 [J]. 信号处理, 2014, 30(1):72-85.
WANG Liandong, ZENG Yonghu, GAO Lei, et al. Technology Status and Development Trend for Radar Detection of Hypersonic Target in Near Space[J]. Signal Processing, 2014, 57(4):1-12. (in Chinese)
- [4] LIU Liping, ZHANG Zhiqiang, YU Danru, et al. Comparison of Precipitation Observations from a Prototype Space-Based Cloud Radar and Ground-Based Radars[J]. Advances in Mosppheric Science, 2012, 29(6):131-132.
- [5] DUAN H B, LI P. Progress in Control Approaches for Hypersonic Vehicle[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(10):2965-2970.
- [6] 李亚柯,梁晓庚,郭正玉. 临近空间攻防对抗技术发展研究[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5):24-30.
LI Yake, LIANG Xiaogeng, GUO Zhengyu. Research of Near Space Attack-Defense Confrontation Technology[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2013, 34(5):24-30. (in Chinese)
- [7] 刘钦. 多传感器组网协同跟踪方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
LIU Qin. Study on Cooperative Network Collaborative Tracking Algorithm with Multi-Sensor[J]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [8] 王欣,姚佩阳,周翔翔,等. 信息共享条件下传感器组网发现概率建模 [J]. 光电与控制, 2012, 11(19):26-30.
WANG Xin, YAO Peiyang, ZHOU Xiangxiang, et al. Detection Probability Modeling of Sensor Network Based on Information Sharing[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 11(19):26-30. (in Chinese)
- [9] 李洋思,张科,余瑞星,等. 攻击时敏目标的多传感器协同探测技术[J]. 计算机与现代化, 2013, 6:30-33.
LI Yangsi, ZHANG Ke, YU Ruixing, et al. Multi-Sensor Cooperative Detection Techniques for Time Critical Target Cooperative Striking[J]. Computer and Modernization, 2013, 6:30-33. (in Chinese)
- [10] 邓艳丹,黄生洪,杨基明,等. 一种 X-51A 相似飞行器模型的气动特性初探[J]. 空气动力学学报, 2013, 31(3):376-380.
DENG Yandan, HUANG Shenghong, YANG Jiming, et al. A Preliminary Investigation on Aerodynamic Characteristics of an X-51A Like Aircraft Model[J]. ACTA Aerodynamica Sinica, 2013, 31(3):376-380. (in Chinese)
- [11] GAO Z F, JIANG B, SHI P, et al. Passive Fault-Tolerant Control Design for Near-Space Hypersonic Vehicle Dynamical Systems[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2012, 31(2):565-581.
- [12] 付强,王刚,郭相科,等. 临空高速目标协同探测跟踪需求分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4):758-762.
FU Qiang, WANG Gang, GUO Xiangke, et al. Requirements Analysis on Collaborative Detection and Tracking of Near Space High-Speed Targets[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(4):758-762. (in Chinese)
- [13] QUAN A J, SUN X D, ZHU L X. A Signal Detection Method for Harmonic Signal Submerged in Complex Noise Background[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 397-400:2262-2265.
- [14] 周金伟,李吉成,石志广,等. 高超声速飞行器红外可探测性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5):1-8.
ZHOU Jinwei, LI Jicheng, SHI Zhiguang, et al. Research of Infrared Detectability of Hypersonic Vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5):1-8. (in Chinese)
- [15] ZHANG Q, WU Q X, JIANG C S, et al. Robust Adaptive Control for A Class of Uncertain Switched Nonlinear Systems with Application to Near Space Vehicle[C]//Proc of the 31st Chinese Control Conference, 2012:3113-3118.
- [16] QING Y Y, Mou C. Composite Nonlinear Control for Near Space Vehicles with Input Saturation Based on Disturbance Observer[C]//Proc of the 32nd Chinese Control Conference, 2013:2763-2768.
- [17] MASAHIRO FQJII, HIROYUKI HATANO, YU WATANABE. A Study on Cooperative Detection Scheme Based on Combination for Cognitive Radio Systems[C]// 2013 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, 2013:136-141.
- [18] WU Nan, CHEN Lei. Trajectory Estimation of Hypersonic Vehicle Based on Observations from Infrared Sensor on LEO Satellite[J]. Informatics in Control, Automation and Robotics, 2011, 132:633-640.
- [19] BOURAOUI Rahma, BESBES Hichem. Impact of Cooperative Detection on Primary System's Qos in Cognitive Radio Networks[C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2013:46-50.
- [20] 肖秦. 协同探测中传感器管理的优化方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4):97-100.
XIAO Qin. Optimized Sensor Management Method in Cooperative Detection[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2013, 34(4):97-100. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)