

# 雷达探测临近空间高超声速目标关键技术研究

罗 健

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

**摘要:** 随着临空高超武器陆续取得技术突破和试验成功, 其对探测感知和系统防御带来的挑战也逐渐由概念设想转变为重大现实威胁。本文从临空高超目标轨道特性、运动特性、电磁散射特性对雷达探测带来的技术挑战出发, 分析雷达探测临空高超目标需解决的关键技术问题, 提出在临空高超目标的高速、大机动、等离子鞘套带来的目标检测、跟踪、鞘套目标识别等问题的技术解决路径。以体系化作战为核心, 分析提出反临探测体系需重点解决覆盖性、时效性和协同性等关键问题, 探索构建探测-跟踪-打击链闭环的探测体系需求和技术路径。

**关键词:** 临近空间; 高超声速飞行器; 雷达探测; 探测体系; 防御系统; 等离子鞘套

中图分类号: TN95 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)06-0640-11

## Research on Key Technologies of Radar Detection of Near Space Hypersonic Weapon

LUO Jian

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

**Abstract:** Consistent breakthroughs in near space hypersonic weapon technology are presenting existential threats to early warning detection and defense systems. In light of the challenges that the technical characteristics (orbital/motional/electromagnetic) of near space hypersonic targets pose to radar detection, this paper details the most pressing technical problems to be tackled by radar systems, and proposes corresponding solutions in detection, tracking and recognition of near space hypersonic targets that features high speed, high mobility and plasma sheath. Aiming for systemized combat operations, the paper further discusses the critical challenges of improving detection coverage, timeliness and coordination in near space target detection, and explores approaches to near space target detection system development by building a closed-loop detection-track-defeat system.

**Key words:** near space; hypersonic vehicle; radar detection; detection system; defense system; plasma sheath

## 0 引言

临近空间高超声速目标一般指在临近空间飞行的航空航天飞行器, 能在大气层和跨大气层的近空间高速飞行, 其飞行速度一般大于 5 Ma, 目前临近空间超高速武器主要为高超声速助推滑翔飞行器和高超声速巡航飞行器<sup>[1-2]</sup>。临近空间高超声速目标以其速度快、高机动、大航程、强突防等特点, 可在发射后极短时间内对任意目标进行快速精确打击, 成为打破战略平衡, 夺取未来战争主动权的核心手段。

在 X-51A、HTV-2 等项目关闭之后, 美国相继推出了高速打击武器(HSSW)、先进高超声速武器(AHWC)和高超声速战略助推滑翔飞行器 AHW 和 TGB 等计划; 而俄罗斯宣称实战化部署“匕首”高超声速空射导弹和“先锋”高超声速滑翔弹头, 近期其“锆石”高超声速反舰巡航导弹连续多次成功试射<sup>[3-8]</sup>。随着美、俄等国临近空间高超声速武器陆续取得技术突破和试验成功, 临近空间高超声速目标带来的挑战也逐渐由概念设想转变为重大现实威胁。

由于临近空间高超声速目标“亚轨道飞行”和“高速大机动”的独特性, 其目标特性与隐身飞机

类空气动力目标和进出临近空间的弹道目标有显著差别,针对临近空间高超声速目标的探测和防御,国内外学者从防御策略、技术分析、性能仿真和试验验证等方面取得了许多研究成果<sup>[9-11]</sup>。其中主要有从雷达探测面临的问题,分析了临近空间高超声速飞行器对雷达探测体系的性能需求,雷达检测/跟踪临空目标在信号处理、数据处理等方面的技术方法,并给出仿真计算结果。从探测技术上分析了对于高速高机动目标不同检测积累方法,提出探测临空高超目标的高速高机动目标检测技术、高速大动态目标跟踪技术、反等离子鞘套效应措施建议等。在临近空间目标跟踪上从动力学模型和运动特性分析、机动模型构建、交互多模型应用和目标轨迹预报方法等方面进行了研究。从OODA探测打击闭环链上提出对预警探测、导弹总体、制导控制等专业带来的新问题和新需求进行了详细分析;从探测传感器组网上提出了在现有装备体系上发展和建立新型武器防御体系,提出了传感器协同探测体系构建,武器协同作战体系,网络化指挥控制体系建设构思等。

随着雷达探测临空高超声速目标技术研究和试验仿真的深入,在临近空间高超声速目标的亚轨道飞行目标远域高概率截获,高速大机动带来的目标检测、跟踪、鞘套目标识别,跨域异构/网络化协同探测体系的构建与运用、高效探测/打击OODA链闭环等方面还有诸多问题尚待解决和突破。本文以体系作战为核心思想,从雷达探测关键技术、探测体系网络化、探测-跟踪-打击链闭环等多个方面进行分析探讨,对反临近空间目标探测研究给出技术发展建议。

## 1 临空高超声速目标的技术挑战分析

### 1.1 亚轨道飞行特性及带来的挑战

临近空间一般指高度20~100 km的近地空间过渡区,包括大气平流层区域、中间大气层区域和部分电离层区域,临近空间的显著特点之一是空气相对稀薄,为各类临近空间飞行器的高速化提供了基础<sup>[12]</sup>。亚轨道一般指高度在60~120 km的近地空间区域,临近空间助推滑翔飞行器的“亚轨道”属性更强,而临近空间吸气式高超声速

飞行器一般在“亚轨道”下缘飞行(如图1所示)。临近空间高超声速目标在20~100 km高度几乎与地面平行的亚轨道“壳层”中飞行,对于以直线/准直线为传播方式的电磁波、光电等探测手段来说其带来的影响是致命的。由于地基雷达视距效应极大压缩雷达探测空间和预警时间(如图2所示),从仿真结果看,对于地基探测雷达其水平探测视角20 km高度目标相对100 km高度目标探测视距缩减约55%。同时通过仿真计算表明,10 Ma临空高超声速目标相对同样射程的常规弹道导弹预警时间压缩约61%,由于滑翔弹道纵向跳跃的高度维大机动也会带来探测不连续。

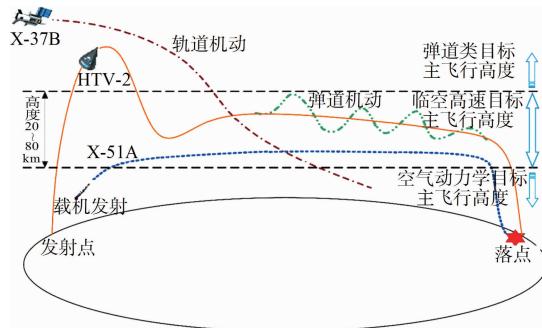


图1 临空高超目标飞行轨道示意图

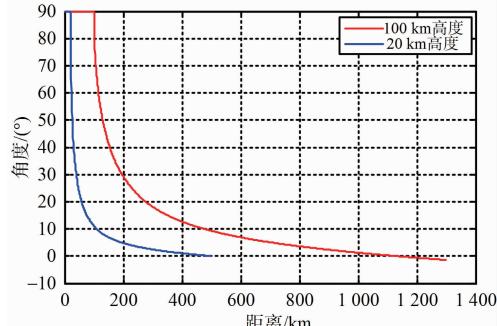


图2 雷达对不同高度目标探测视距分析

临空高超声速目标亚轨道飞行特性给预警探测体系带来的挑战是颠覆性的,突破了目前防空预警体系的高界和远界,由于视距限制极大降低了反导预警系统的远程探测威力,其灵活多变的发射方式给早期红外预警带来很大的不确定性。分析表明,增加雷达单装探测能力不能从根本上提升系统反临探测能力,解决亚轨道飞行目标的有效覆盖必须是构建临近空间目标预警探测体系,将在第3节深入讨论。

### 1.2 高超声速及速度隐身特性

高超声速是临近空间超高速目标的最大特质

之一,由火箭发射的临近空间助推滑翔飞行器速度一般在 8~25 Ma,吸气式高超声速巡航飞行器速度一般在 3~15 Ma,目前在试在研在役的各类临近空间超高速目标雷达 RCS 一般在 0.02~0.5 m<sup>2</sup><sup>[13]</sup>,对于高速小目标除了增加功率孔径积以外,增加波束驻留时间和多普勒域积累是检测远程微弱目标的基本途径。长时间积累对于高速运动目标极易产生跨距离和跨多普勒的“双跨”现象,对于以积累最大检测信噪比为优化目标的雷达远程探测,使常规的雷达脉冲积累得益急剧下降,仿真分析表明相对于 600 m/s(1.91 Ma)速度目标,当速度增加到 6 000 m/s(19.1 Ma)时由于“双跨”影响使其信噪比下降 10~15 dB<sup>[14]</sup>,由于目标高超声速运动特性带来探测性能下降产生“速度隐身”现象是临空高超目标的显性特质。

高超声速目标的跟踪-拦截过程也是一个极大的挑战,对于采用地空导弹拦截高超声速武器跟踪-拦截过程,采用蒙特卡洛法模拟仿真分析拦截概率,推算出高超声速武器不同飞行速度的突防成功概率表明<sup>[13-14]</sup>,对于 5 Ma 高超声速武器目标散射截面(RCS)由 1 m<sup>2</sup> 降低到 0.5 m<sup>2</sup>,突防成功概率由 57% 提高到 78%;高超声速武器目标模型不变(RCS 为 0.5 m<sup>2</sup>),而速度由 5 Ma 提高到 6 Ma,突防成功概率由 78% 提高到 89%<sup>[15]</sup>,美国“臭鼬工厂”对高超声速武器攻防对抗的仿真结果类似<sup>[16]</sup>。理论与仿真表明,速度是高超声速武器隐身突防的有效途径。同时高超声速武器近直线高速度飞行也极大压缩了 OODA 链的响应时间,仿真表明速度 25 Ma/高度 100 km 的临空高超目标相对于 3 Ma/高度 100 km 超声速目标,预警时间仅为后者的 1/9,极大压缩了 OODA 链节点间的响应时间,使得单一装备不能独立完成探测-跟踪-打击链的闭环。高超声速武器的高速度,压缩了 OODA 链节点的响应时间,突出了在战争中的速度制胜、瘫痪要害的优势,将导致现有防御系统没有足够的预警和反应时间,即使发现目标也难以实施拦截。

### 1.3 多维高机动特性及技术挑战

机动特性是飞行目标的通用属性,目标机动也是雷达从背景噪声中检测目标的技术依赖路径之一,但临空高超声速目标机动具有其不同于其

他目标的运动复杂性、多样性和随机性。其纵向、横向和加速度均具有较强的机动性和变化率,如图 3 所示(其中红色为近界,蓝色为远界)。高超声速滑翔武器是一种高升阻比飞行器,一般采用火箭助推的方式从地面送入几十公里高空,其飞行速度一般为 8~25 Ma,依靠空气动力远距离弹跳飞行,并最终俯冲至目标完成攻击任务,最大横向机动能力约为射程的 1/3。

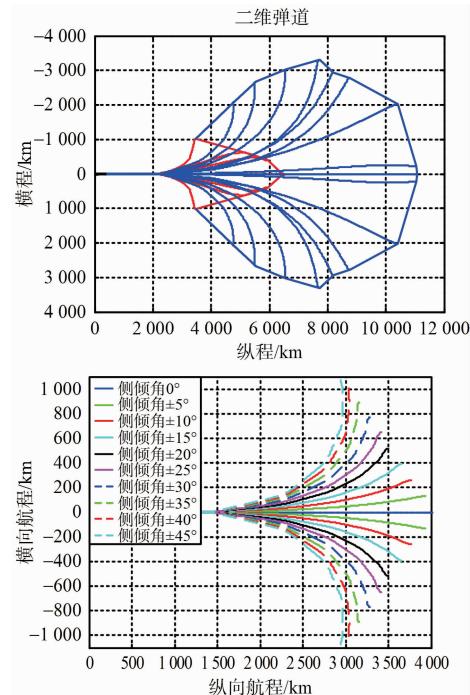
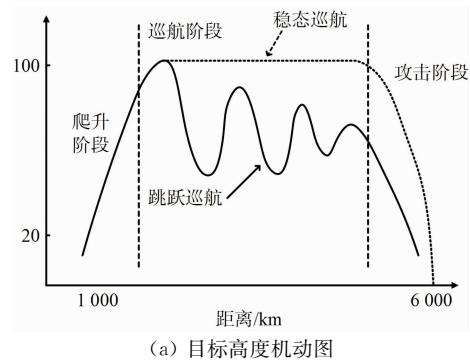


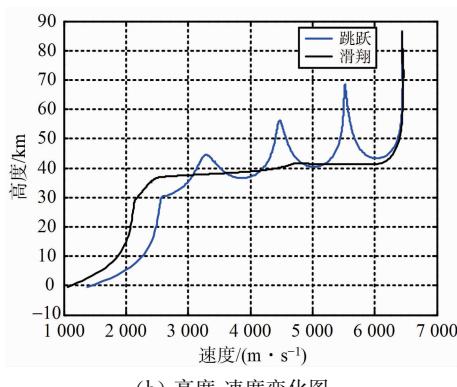
图 3 临空高超目标横向机动覆盖及运动变化图

高度变化带来探测空间扩展和目标速域大范围变化,尤其是横向机动带来空域跨度宽和航迹角剧烈变化,如图 4 所示。

临空高超声速目标多维高机动特性对雷达带来的挑战:一是将探测空间由反远程弹道类目标的一维空间扩展到二维空间,雷达将消耗更多的资源在持续监视和跟踪上,如果是多目标场景对



(a) 目标高度机动图



(b) 高度-速度变化图

图4 临空目标高度机动及速域变化图

探测体系资源消耗将带来探测能力的大幅降低;二是由于目标机动的复杂性、随机性和多样性,对高速大机动目标的稳定跟踪和精确测量一直是临空高超声速探测一个极具挑战性的技术难题。

#### 1.4 等离子鞘套效应及其影响分析

等离子体与电磁波的作用机理研究历经半个世纪以上,随着高超声速目标的发展,国内外诸多学者围绕高超目标等离子鞘套效应进行了大量卓有成效的研究<sup>[17-25]</sup>。但对于雷达探测临空高超目标等离子鞘套效应的深入研究分析和试验报道较少,对等离子鞘套效应可能带来的深刻影响重视不够,本文针对等离子效应对雷达探测影响从三个角度进行阐述。一是超高速目标对雷达探测等离子鞘套效应存在且影响较大:美国20世纪60年代开展的RAM-C等离子鞘套试验研究,其试验数据表明在VHF、C和X波段在35~78 km高度分别出现“黑障”效应和电磁传播剧烈衰减现象,其中阿波罗13号飞船返回舱出现长达6分钟的“通信黑障”<sup>[26-27]</sup>。国内利用测量雷达和气象雷达观测返回舱探测试验,通过多次飞船返回舱的雷达观测数据分析表明,随着目标再入高度的变化由于等离子鞘套效应呈现RCS突增、衰减和平稳三个阶段,时间一般持续约4分钟,其返回舱产生等离子鞘套示意图如图5所示,国内某气象雷达观测“返回舱”等离子鞘套效应表明在RCS衰减段目标是丢失的,如图6所示<sup>[28]</sup>。

二是等离子鞘套对雷达探测影响机理清晰:鞘套等离子体是电离化的气体,由大量的电子、离子和中性离子混合组成,宏观上大体呈电中性的传输介质,与电磁波作用会产生折射、吸收、碰撞、

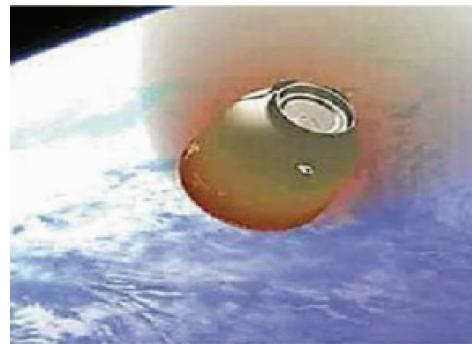


图5 “返回舱”等离子鞘套效应示意图

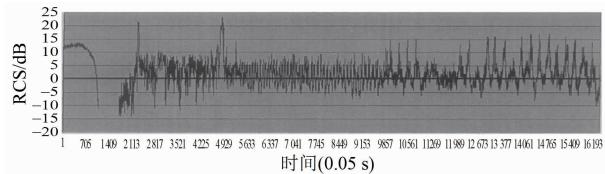


图6 某气象雷达观测返回舱等离子鞘套效应信号

(其中红色框为RCS衰减段)

相移等。飞船返回舱在返回下降过程中速度极高(一般大于20 Ma),当返回舱进入稀薄大气层时,由于强烈的激波压缩和粘性摩擦作用使返回舱周围的温度迅速升高至6 000~8 000 K,使空气发生离解和电离,形成峰值电子数密度为( $10^{10} \sim 10^{14}$ )/cm<sup>3</sup>的电离层<sup>[20-21]</sup>,这个包覆在返回舱周体的电离层即为等离子鞘套。理论分析和地面试验数据表明,当飞行速度小于10 Ma,绕流流场基本没有发生电离<sup>[19,23,30]</sup>,流场中的电子、离子密度很低,根据多个通信频段的测试数据,在飞行速度10 Ma以下的高超声速目标在飞行过程中无“黑障”现象。三是鞘套对雷达探测影响除了鞘套衰减、还有相位偏移和鞘套拖尾:包覆等离子体除了对电磁波碰撞吸收和折射以外,还对电磁波产生色散和相移影响,导致反射回波出现相位偏移和扭曲,在回波频谱上出现频谱分裂产生“虚警”。高速目标包覆等离子体包括等离子鞘套和尾流,尾流长度取决于多种因素,一般为飞行器底部尺寸的10~100倍<sup>[21]</sup>,鞘套拖尾使目标散射质心偏移,影响目标本体检测和降低跟踪精度。

## 2 雷达探测临空高超声速目标关键技术

从雷达技术的发展历程来看,探测技术与目标反探测技术的发展始终是一对矛与盾的较量,

对于雷达探测系统来说,不同于以往雷达面临的新型目标挑战,临空高超声速目标将诸多特性集于一身,对雷达探测技术的挑战也是全方位的<sup>[29-32]</sup>。分析表明,临空高超声速目标对雷达技术本质的技术挑战可以归纳为三个主要方面:全隐身特性、高动态特性和亚轨道特性。临空高超声速目标的全隐身特性是临空目标的本体特性,提出的全隐身概念包括目标隐身、速度隐身、鞘套隐身和轨道隐身;高动态指目标高速多维大机动特性,亚轨道是临空目标独有的飞行弹道特性;对于雷达探测技术来说,主要是解决全隐身、高动态带来的问题和挑战,而亚轨道飞行特性探测主要涉及覆盖性和时效性,不是单纯提高雷达技术和单装探测性能可有效解决的,需要构建临空目标预警探测体系进行解决。雷达探测临空高超声速目标的关键技术也将围绕这三个方面展开讨论。

## 2.1 临空高超声速目标积累检测技术

随着雷达反隐身技术的发展,对于极小 RCS 隐身目标探测技术方法和运用已取得较大进展。对于以积累最大检测信噪比为优化目标的雷达探测远程临空目标过程,临空超高速目标的高速、高机动运动使得目标的径向距离变化率出现高阶项<sup>[33]</sup>,表现为“跨距离单元”和“跨多普勒单元”现象,即回波能量在距离维和多普勒维出现扩散。经过最近十几年的研究,常规高速运动目标雷达检测方法已经取得了较大进展,在高速目标距离徙动和多普勒扩展补偿和积累上开展了大量的研究并取得一定的成果<sup>[33-39]</sup>,对于高速匀速和匀加速度运动具有较好的解决方法,常规高速运动目标的距离徙动和多普勒扩展补偿相参积累取得较好的结果,如图 7、图 8 所示,其关键算法如 Keystone 变换、Hough 变换和 RFT 变换均很成熟,在工程实践中也取得较好的效果。

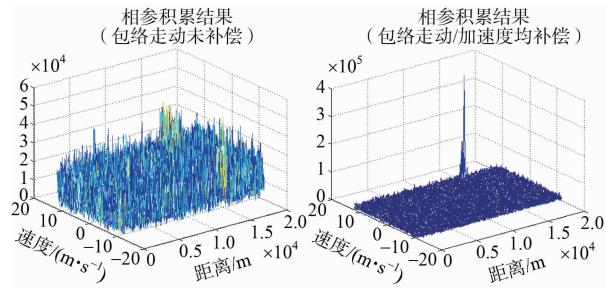


图 7 高速运动目标距离徙动及补偿

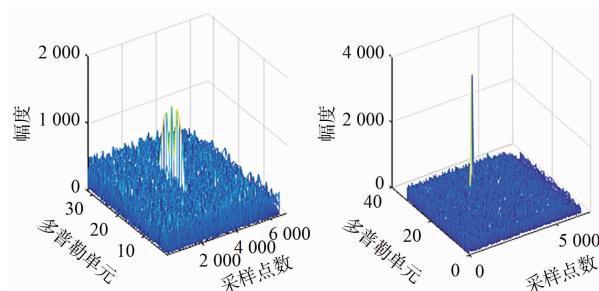


图 8 高速运动目标多普勒扩展及补偿

临空高超声速目标飞行段具有高度跳跃和横向转动运动特性,决定了其是一个高速匀速/匀加速度运动和高速/变加速度运动混合模型,尤其是高速变加速度运动模型需要更多的参数来描述目标的运动情况,具有典型的高阶运动模型,目前有学者针对该问题建议采用搜索积分类方法,其思路是利用 RFT 方法向高维参数空间推广,对距离、速度、加速度进行联合估计可沿着目标弯曲轨迹进行相参积累,代表方法有二阶 RFT 和 RFR-FT 等<sup>[38]</sup>,但这类方法存在着运算量大的突出问题。对于具有高阶运动特性的临空高超声速目标积累检测仍然存在挑战:一是目标运动过程的复杂性,高阶运动模型的参数化表达本身就比较棘手,其飞行过程中还存在不同运动特性模型交织混合,基于该混合模型的检测方法目前研究成果较少,对应的目标积累检测方法也就变得更加复杂;二是目标运动的高动态性,滑翔跳跃过程的变加速度和大角速度的横向转动需要寻找一些新的补偿思路和算法,需要解决多域走动同时校正问题和联合补偿方法,探索参数空间快速多维搜索和构建广义滤波器实现补偿和积累等<sup>[35-37]</sup>;三是算法实时性和工程实现性,现在提出的针对高阶运动的补偿积累处理方法存在运算量大、实现复杂,实时处理难度大等问题,同时目前应用场景一般只考虑单一目标问题,对于多目标的检测问题是另一个技术难题。

## 2.2 高超声速高机动目标精确跟踪技术

临空高超声速目标的高动态特性主要是指基于高速度的三维机动和变加速度,如图 9 所示,其纵向、横向和加速度均具有较强的机动性和变化率,对稳定跟踪带来的问题是探测空间扩展、目标运动速域和航迹角变化剧烈、运动模型复杂且不确定等;其对高精度测量带来的问题是低信噪比、

误差估计模型复杂、等离子鞘套拖尾回波拉伸和探测仰角快速变化带来的大气折射/吸收误差严重等,本质上高精度测量与稳定跟踪是密切关联的。

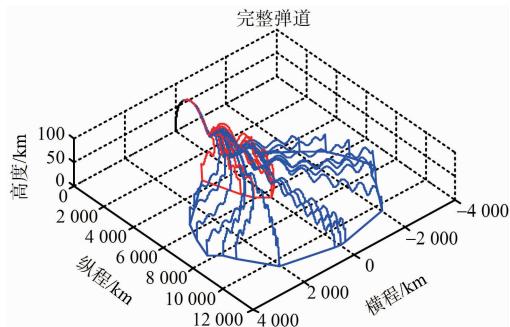


图9 临空高超目标滑翔飞行运动仿真

临空高超声速目标的高动态性是一个共识性问题,国内外多数学者认为相对于发现目标来说,对临空高超目标的稳定跟踪和高精度测量是一个更棘手的挑战,对临空高超声速目标的实时高精度跟踪是拦截打击目标的基础。机动目标跟踪问题本质上是对预测系统的状态描述,跟踪算法主要由运动模型与滤波算法组成,滤波算法主要描述量测噪声的统计分布特性,主要有维纳滤波(WF)、卡尔曼滤波(KF)、粒子滤波(PF)算法及扩展,滤波算法对不同运动模式、噪声环境和量测残差样本具有较强的依赖性<sup>[39]</sup>。临空高超声速目标跟踪的难点主要在于以下两点:一是运动模型的不确定性和复杂性,具有高速匀速/匀加速度运动和高速/变加速度运动混合模型特征;二是在跟踪测量过程中,由于探测低信噪比、等离子鞘套拖尾和环境的不确定性,造成测量误差增大和量测噪声统计分布特性的不确定。文献表明在临空高超目标跟踪模型、误差估计等方面针对不同场景已开展诸多研究和仿真工作,提出了包括 Singer、CS、IMM 等具有代表性的运动模型方法,取得较好的进展并给出具有建设性的方法<sup>[40-45]</sup>。但目标机动建模主要依赖于先验运动特性分析,当前大部分关于临空高超目标跟踪算法的研究都是基于场景设定机动模型,缺乏足够的试验数据支撑,对于实战化运用还有一定的差距。

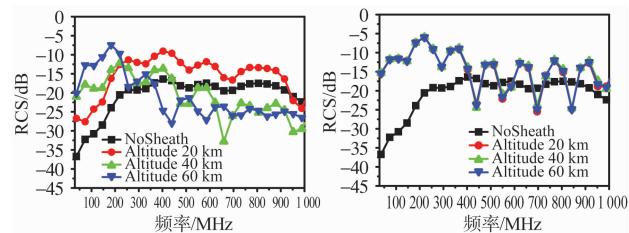
其中高超声速助推滑翔飞行器由于其特殊的跳跃滑行飞行弹道,给雷达跟踪测量带来的是全新的运动模型。雷达探测跟踪主要关注其无动力滑翔段的周期性滑跃式机动飞行,根据滑跃式机

动飞行的受力情况分析,其加速度变化范围非常大,其上升段加速度逐渐降低,在滑跃飞行高点加速度和速度最小,随后随着俯冲段加速度逐渐增大,在滑跃飞行低点加速度和速度最大。文献[41]对高超声速助推滑翔飞行跟踪模型开展研究工作,将目标加速度建模为具有正弦波自相关的零均值随机过程,建立了新的跟踪模型,仿真结果表明跟踪精度要高于 Singer 模型、Jerk 模型和基于 CV+CA+Singer 的交互式多模型。

### 2.3 等离子鞘套特性目标的检测与跟踪技术

等离子鞘套目标的发现和连续观测是临空高超声速目标的独有挑战,目前国内外关于临空高超声速目标等离子鞘套衰减效应研究和试验不够充分,其中一个重要原因是实战化威胁还没有到来,因达到产生电离分解速度的高超声速目标大多还处在试验和攻关阶段,国外列装的几型临空高超声速目标探测数据报道很少,但不说明我们目前的探测能力就完全与之匹配了。

(1) 等离子体本质上是一种弱电离的气体,同其他介质一样具有介电常数、电导率和磁导率,等离子鞘套介电常数和电导率主要由电子密度、等离子特征频率和碰撞频率决定,研究表明电磁波在等离子体中的折射率和衰减率与电磁波频率、等离子特征频率和碰撞频率密切关联,电磁波频率与等离子特征频率的比值变化是鞘套目标 RCS 剧烈变化的主要原因,美国的 RAM-C 试验和国内的气象雷达多次返回舱探测试验表明,随着飞船返回舱高度的降低,鞘套目标 RCS 衰减从低频段向高频段依次出现,VHF 频段出现“黑障”效应或目标丢失一般在 80~50 km,S 和 C 波段目标丢失一般出现在 60~40 km,X 波段目标丢失一般出现在 40~25 km。我们对不同速度目标的有无鞘套 RCS 起伏效应也开展仿真研究,如图 10 所示,其结论相仿。



(a) 入射角和方位角大于 10°(10 Ma(左), 20 Ma(右))

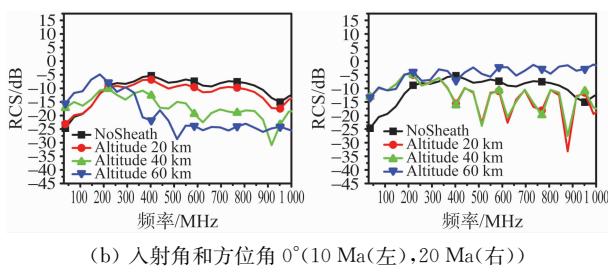
(b) 入射角和方位角  $0^\circ$ (10 Ma(左), 20 Ma(右))

图 10 不同速度/有无鞘套目标 RCS 起伏仿真图

从理论分析和观测试验两方面均表明等离子鞘套效应与电磁波频率密切相关,一般来说采用不同频段雷达探测可以解决鞘套包覆目标探测问题,但考虑单部雷达探测的视距效应,对于方位宽开的二维观测平面的频率、视距弧段做到全时段连续观测,不是一个简单的雷达频段选择问题,如果按照异频同地部署资源浪费严重且成本太大。按照目前国外部署的雷达探测装备技术参数分析,其远程低频段、近程高频段的雷达频率覆盖,与高超声速目标在不同高度层产生的等离子鞘套频率效应吻合,需要寻找一个更加合理和高效费比的解决方法。

(2) 鞘套目标跟踪、目标本体识别是雷达探测临空高超声速目标需要解决的另外一个问题,高速目标等离子体包括等离子鞘套和尾流,等离子体鞘套和尾流与飞行器高度、速度、形状、姿态、烧蚀等因素密切相关且快速变化,尾流长度一般为飞行器底部尺寸的 10~100 倍,据研究分析最大尾流长度可达数公里量级<sup>[18,20]</sup>。通过返回舱观测数据,高度 80 km 开始产生等离子鞘套其 RCS 随着高度降低呈现 RCS 增加和衰减段,这两个阶段均产生鞘套拖尾使目标散射质心产生偏移,有研究表明钝锥体再入飞行器雷达回波主要来自于尾迹湍流散射<sup>[28]</sup>。对于滑翔飞行高超声速目标其鞘套效应随速度和目标高度快速变化,仿真及实验室测试数据表明由于鞘套效应目标 RCS 起伏超过 30 dB。

由于鞘套包覆目标本体识别和散射质心偏移使拦截和打击效能下降,如何解决目标本体识别是一个亟待解决的技术难题,根据鞘套特性分析采用较高频段具有穿透包覆鞘套层能力,但较高频段的传播衰减、耐候性和跟踪资源消耗限制其大规模使用。分布式雷达利用空间分集可提高鞘套目标测量精度,且利用不同观测视角的目标回波包络起始辅助识别目标本体,但其解算的基本

条件是高精度时间同步和同时空间共视,对于采用机扫体制或观测方向固定雷达来说其空间分集得益较低。

(3) 随着轨道再入滑翔超声速和空天跨域打击武器的发展,超过 10 Ma 高速目标的等离子鞘套效应对探测影响将会越来越近,而鞘套效应与目标速度、高动态紧密耦合,反鞘套探测也必须与高速、高动态目标检测、跟踪联合处理。一是开展超声速飞行器本体及绕流 RCS 特性、亚密湍流尾迹 RCS 和层流尾迹 RCS 特性仿真分析和试验研究;二是开展针对鞘套拖尾散射质心偏移分析不同探测波形和调制方式降低和消除鞘套拖尾带来的影响;三是针对鞘套色散和相移影响分析不同频段、带宽、脉宽、极化等参数和信号处理方法消除和降低影响。

### 3 临空高超声速目标预警探测体系技术

临空高超声速目标的高速度带来战场时空的巨大压缩效应,颠覆了传统战场的时间、空间概念,其亚轨道飞行特性极大压缩了预警探测体系的探测空间,多数学者对此开展了研究并提出一些建设性的发展思路<sup>[46-52]</sup>,其技术挑战的本质是改变探测体系的覆盖性、时效性和协同性,仅依靠提高和改善单项雷达技术和单装探测性能不能从根本上解决问题。其实临空高超声速目标作为连接传统空、天领域的新兴作战空间武器的出现,从某种程度上也倒逼探测体系的升级和发展。

解决反临预警探测体系必须要解决哪些关键技术问题,是构建探测体系必须考虑的前提条件。对于亚轨道飞行目标要达到早期发现与告警,覆盖性是首先要解决的重点问题,探测平台升高是较好的选择,从国外发展路线来看低轨卫星载探测载荷是一个选择(本文不讨论红外探测技术)。针对低轨低成本卫星平台雷达载荷探测临空高超目标开展初步技术研究和性能仿真,初步仿真分析表明对低轨雷达载荷对高度 20 km 以上飞行的临空高超目标可实现探测和短弧段跟踪,如图 11 所示,采用 600 km 轨道/低成本卫星平台实现南北纬土  $30^\circ/5 \text{ min}$  重访覆盖需要 180 颗卫星,全球预警需要更多的卫星资源。星载平台的重访间隔

降低了体系的覆盖性和时效性,同时星载平台探测跟踪精度也不能直接支持空/地拦截武器打击。平流层平台具有长时滞空和远程探测能力,但其长时间可提供能源不能满足探测载荷的远程探测能力,其全方位覆盖不够和抗毁性差是其弱点。空/天基预警广域覆盖能力是其突出优点,时效性和高精度是其弱点,地基雷达外延布置也是解决覆盖性的一个较好路径。

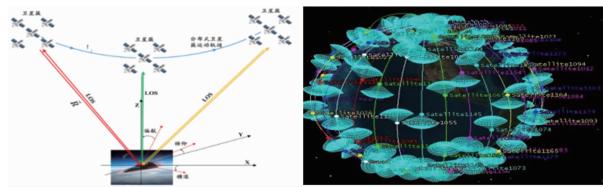


图 11 低轨雷达预警星座组网及协同探测系统仿真

天基预警可解决早期预警问题,但其时效性和跟踪精度不能支撑拦截打击要求,地基或空地联合探测体系是反临绕不过去的探测手段。反临探测体系的时效性是支撑拦截打击的重要因素,反临防御最终目的是实现有效拦截打击,预警探测体系作为 OODA 环中的重要环节不可或缺,持续监视、协同跟踪和低时延处理是确保系统时效性的核心关键技术。持续监视跟踪是保证时效性的基本前提,目标丢失或重新捕获对体系时效性会带来致命影响,持续监视跟踪也保证了高速目标的检测、跟踪和高精度测量。电磁波的直线传播特性要覆盖类似“地壳”的临空目标飞行曲面,必须采用“拟合”,而多雷达“有机衔接”是解决“拟合”的有效途径,建立高置信度的持续监视跟踪能力必须建设高广度和高深度的协同探测体系,探测节点资源具有分布性、协同性和融合性的特点,其针对具有高速高机动目标的协同探测过程是一项复杂的系统工程。

仿真数据表明探测体系针对临空高超目标其预警时间压缩为一般战斗机的 1/10~1/15,如图 12 所示。一般意义上的协同探测装备间信息接力传递,重复区域截获、跟踪收敛、高精度测量等过 程,不能满足临空高超目标的时空压缩要求。

参照国外主力探测装备参数进行分析,以现有防空系统的数据率和反导系统的 TAS 工作方式,进行简单的探测资源重组和联合不满足反临预警要求<sup>[53-57]</sup>。依据国外典型的弹道预警系统信息传递链路来看,其早期预警雷达截获跟踪→精

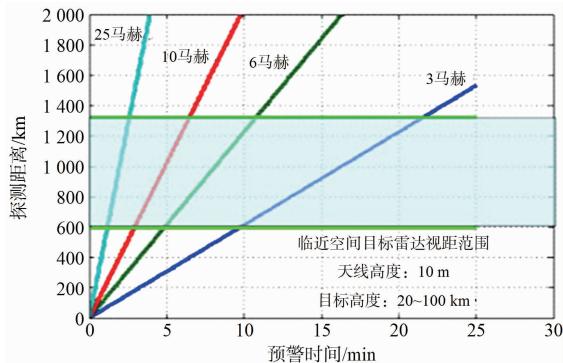


图 12 临空高超目标速度-预警时间

密测量跟踪输出一般占预警系统反击 1/3 时间,对于中近程弹道导弹预警来说一般在 3~5 min,而对于临空高超声速武器 3~5 min 基本完成主体攻击过程,要求探测-跟踪-打击闭环一体化才能满足反临探测时效性的要求,反临协同探测的高时效性决定其必须共享探测数据并形成协同跟踪通道<sup>[57-60]</sup>,诸多学者研究认为必须建立网络化协同探测体系才能满足反临防御作战的需求<sup>[61-64]</sup>。分析表明,低时延处理是反临系统成败的关键,也是贯穿整个反临体系最重要的要素,实现对低时延处理就是压缩反临体系各环节的时间消耗,除探测、跟踪、识别外,低时延决策链和低时延闭环打击链也是反临体系的重要环节,但不在本文讨论范围内。

分析表明,从技术实现上针对高速高机动临空目标的协同探测是一项系统工程,从装备体系建设上需要重塑预警探测体系,重塑既不是推倒重来也不是简单组合,如何重塑还是要回到临空目标对探测体系技术挑战的本质和根本问题,就是围绕如何提升探测体系的覆盖性、时效性和协同性。进一步分析表明,对于高速高机动临空目标探测来说需要更高的协同性和聚合性,即需要建立按临空目标飞行走廊进行探测资源聚合新的探测装备协同模式,其体系架构不是雷达装备按照一定方式的组合,而是首先构建一个网格体系架构,网络节点是分布式网络化雷达装备,网络化探测体系结构需满足统一时空基准、统一数据处理、协同搜索跟踪、全域共视探测等基本要求。其解决的主要问题有:一是分布式网络化探测系统分布式协同探测,相邻阵列协同工作,形成覆盖目标飞行区的协同探测通道和协同跟踪通道,基于一体化探测数据联合处理,避免了多雷达间的多

重截获-跟踪-识别数据传递,协同探测可以快速转换为协同制导,极大压缩了预警-跟踪时间;二是分布式网络化探测装备的同时共视协同探测可实现系统的“空时频能”多维资源聚合,提升整个网络化探测体系的检测/跟踪能力,同时改善临空高超目标的等离子鞘套效应和本体识别能力;三是探测装备的蜂窝式协同和相邻阵列协同工作,共享和联合处理探测数据可推动生成覆盖临空目标飞行走廊的“探测云”,依据“探测云”可获得探测体系的凝视/准凝视探测能力,得到精确的目标实时速度参数,建立四维( $R$ 、 $\alpha$ 、 $\theta$ 、 $v$ )跟踪滤波模型,可提升具有高阶运动模型特征的临空目标高精度跟踪能力。

4 结束语

本文从临空高超声速目标特性带来的全隐身特性、高动态特性和亚轨道特性出发,剖析雷达探测临空目标的几个关键技术并进行详细分析,提出高速高机动目标检测、高动态目标跟踪和高精度测量及等离子鞘套效应是反临预警需解决的主要技术问题,针对临空高超目标的亚轨道特性和反临高时效性需求,提出必须建立探测-跟踪-打击闭环一体化的预警探测体系,针对关键技术和探测体系建设给出技术路径和发展建议。高超声速目标给预警探测体系带来的技术挑战是全方位的,防御和反击临空高超声速目标是一个系统工程,雷达是整个防御反击链中重要的一环,雷达探测高超声速目标技术难点专业跨度大、技术难度高,目前取得的一些技术成果还缺乏充分的实际数据检验,需要各领域各专业的联合技术攻关,相关技术难题还需要开展大量的探索性研究工作。

#### 参考文献:

- 重截获-跟踪-识别数据传递,协同探测可以快速转换为协同制导,极大压缩了预警-跟踪时间;二是分布式网络化探测装备的同时共视协同探测可实现系统的“空时频能”多维资源聚合,提升整个网络化探测体系的检测/跟踪能力,同时改善临空高超目标的等离子鞘套效应和本体识别能力;三是探测装备的蜂窝式协同和相邻阵列协同工作,共享和联合处理探测数据可推动生成覆盖临空目标飞行走廊的“探测云”,依据“探测云”可获得探测体系的凝视/准凝视探测能力,得到精确的目标实时速度参数,建立四维( $R, \alpha, \theta, v$ )跟踪滤波模型,可提升具有高阶运动模型特征的临空目标高精度跟踪能力。

## 4 结束语

本文从临空高超声速目标特性带来的全隐身特性、高动态特性和亚轨道特性出发,剖析雷达探测临空目标的几个关键技术并进行详细分析,提出高速高机动目标检测、高动态目标跟踪和高精度测量及等离子鞘套效应是反临预警需解决的主要技术问题,针对临空高超目标的亚轨道特性和反临高时效性需求,提出必须建立探测-跟踪-打击闭环一体化的预警探测体系,针对关键技术和探测体系建设给出技术路径和发展建议。高超声速目标给预警探测体系带来的技术挑战是全方位的,防御和反击临空高超声速目标是一个系统工程,雷达是整个防御反击链中重要的一环,雷达探测高超声速目标技术难点专业跨度大、技术难度高,目前取得的一些技术成果还缺乏充分的实际数据检验,需要各领域各专业的联合技术攻关,相关技术难题还需要开展大量的探索性研究工作。

### 参考文献:

  - [1] 郑义,韩洪涛,王璐. 2020年国外高超声速技术发展回顾[J]. 战术导弹技术,2021(1):38-43.
  - [2] 田宏亮. 临近空间高超声速武器发展趋势[J]. 航空科学技术,2018,29(6):1-6.
  - [3] 范月华,高振勋,蒋崇文. 美俄高超声速飞行器发展近况[J]. 飞航导弹,2018(11):25-30.
  - [4] 李益翔. 美国高超声速飞行器发展历程研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
  - [5] 杨卫丽,廖孟豪,方勇. 美俄高超声速导弹发展取得突
  - [6] 廖龙文,陈军燕,曾鹏,等. 俄罗斯高超声速武器发展概况分析[J]. 战术导弹技术,2021(2):20-25.
  - [7] DONALD D. Final Captive Test for U. S. Air Force's Hypersonic Weapon[EB/OL]. [2020-08-10]. <https://www.aionline.com/aviation-news/defense/2020-08-10/finalcaptive-test-us-air-forces-hypersonic-weapon>.
  - [8] ALI S. Hypersonic Weapons and Strategic Stability[EB/OL]. [2020-01-01]. <https://nsiteam.com/social/wp-content/uploads/2020/01/200115-Wilkening-Slides.pdf>.
  - [9] 黄志澄. 高超声速武器及其对未来战争的影响[J]. 战术导弹技术,2018(3):1-7.
  - [10] 叶喜发,张欧亚,李新其. 高超声速巡航导弹的作战运用及对未来战争的影响[J]. 飞航导弹,2019(4):38-41.
  - [11] ROATEN M. Analysis Question Uniqueness Hypersonic Weapons Capabilities[J]. National Defense, 2021, 105(5):24-26.
  - [12] 杨亚政,李松年,杨嘉陵. 高超音速飞行器及其关键技术简论[J]. 力学进展,2017,37(11):537-549.
  - [13] 孙文,王刚,姚小强,等. 临空高超声速飞行器目标特性分析[J]. 火力与指挥控制,2017,42(1):14-20.
  - [14] 于哲峰,刘佳琪,刘连元,等. 临近空间高超声速飞行器RCS特性研究[J]. 宇航学报,2014,6(6):713-719.
  - [15] 徐勇勤,唐硕. 高超声速武器攻防对抗分析[J]. 弹箭与制导学报,2005, 25(2):91-93.
  - [16] LETSINGER J M. Hypersonic Global Strike Feasibility and Options[EB/OL]. [2012-12-01]. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1018138.pdf>.
  - [17] 牛家玉,许国斌,曹荣达,等. 再入飞行器尾迹流场及其雷达散射效应研究[J]. 空气动力学学报,1996,14(4):422-429.
  - [18] 彭世镠,高巍,牛家玉. 湍流等离子体尾迹雷达散射截面的计算及其影响因素分析[J]. 空气动力学学报,2005,23(1):103-107.
  - [19] 李江挺,郭立新,金莎莎,等. 离子体鞘套中的电波传播特性研究[J]. 电波科学学报,2011,26(6):494-500.
  - [20] 郑灵. 飞行器等离子体鞘套对电磁波传输特性的影响研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
  - [21] 夏俊明. 基于大面积等离子体片的高超声速飞行器黑障效应研究[D]. 北京:中国科学院大学,2015.
  - [22] 陈伟. 等离子鞘套的电磁波传播与散射关键问题研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
  - [23] 苏汉生,赵良,刘秀祥. 高超声速飞行器等离子鞘套

- 反演分析[J]. 电讯技术, 2015, 55(1):1-6.
- [24] 于哲峰, 马平, 张志成, 等. 微波在薄层等离子体中传输效应研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(3):61-64.
- [25] 杨玉明, 王红, 谭贤四. 再入等离子体隐身及反隐身分析[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(4):248-251.
- [26] 朱方, 吕琼之. 返回舱再入段雷达散射特性研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(5):14-16.
- [27] 胡红军, 刘军, 马明. 雷达和USB在黑障区对返回舱捕获跟踪分析研究[J]. 载人航天, 2006(3):49-53.
- [28] 郭志梅. 利用天气雷达网监测神七返回舱试验及基于精细风场的神七伞降轨迹预测研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- [29] 汪连栋, 曾勇虎, 高磊, 等. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势[J]. 信号处理, 2014, 30(1):73-85.
- [30] 刘超峰, 王谷, 张珍铭, 等. 临近空间高超声速目标防御技术需求分析[J]. 现代防御技术, 2015, 43(5):18-25.
- [31] 肖松, 谭贤四, 李志淮, 等. 雷达探测临近空间高超声速目标性能需求分析[J]. 现代防御技术, 2013, 41(5):88-92.
- [32] 商哲然, 谭贤四, 曲智国, 等. 高超声速目标雷达检测方法综述[J]. 现代雷达, 2017, 39(1):1-8.
- [33] 张顺生, 曾涛. 基于Keystone变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 33(9):1675-1678.
- [34] 谢纪岭, 王彩云. 基于距离走动校正和多普勒高阶项补偿的高超音速目标检测方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(9):2002-2008.
- [35] 靳松阳. 临近空间高速机动目标检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [36] 方翠翠. 超高速运动目标相参积累检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [37] 张顺生, 张伟. 低信噪比下基于Keystone变换的多目标检测[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(增刊):23-26.
- [38] 段毅, 商哲然, 谭贤四. 面向雷达高速目标检测的RFT快速实现方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(6):1234-1240.
- [39] 李凡, 熊家军, 张凯, 等. 临近空间高超声速目标跟踪技术研究[J]. 战术导弹技术, 2018(4):39-44.
- [40] 郭相科, 刘昌云, 张雅舰, 等. 临近空间高超声速目标跟踪方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(5):8-12.
- [41] 王国宏, 李俊杰, 张翔宇, 等. 临近空间高超声速滑跃式机动目标的跟踪模型[J]. 航空学报, 2015, 36(7):2400-2410.
- [42] 李君龙, 周荻, 王冠, 等. 临近空间目标跟踪与预报技术研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(3):1-12.
- [43] 李俊杰, 王国宏, 张翔宇. 临近空间高超声速滑跃式机动目标跟踪的IMM算法[J]. 电光与控制, 2015, 22(9):15-19.
- [44] 李凡, 熊家军, 张凯, 等. 临近空间高超声速目标跟踪动力学模型[J]. 宇航学报, 2019, 40(3):266-276.
- [45] 樊友友. 高速高机动目标跟踪算法及应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [46] 杨阳, 李昌玺, 黄兴龙. 美国高超声速武器防御举措及特点分析[J]. 飞航导弹, 2019(9):20-24.
- [47] 戴卫青, 刘杰, 刘康. 浅析俄罗斯空天防御体系发展策略[J]. 空天防御, 2018, 1(1):69-73.
- [48] 戴静, 程建, 郭锐. 临近空间高超声速武器防御及关键技术研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010, 21(3):58-61.
- [49] 包云霞, 张维刚, 李君龙. 临近空间武器对预警探测制导技术的挑战[J]. 现代防御技术, 2012, 40(1):42-47.
- [50] 金欣, 梁维泰, 王俊, 等. 反临近空间目标作战的若干问题思考[J]. 现代防御技术, 2013, 41(6):1-5.
- [51] 肖松, 谭贤四, 王红, 等. 地基雷达探测临近空间高超声速目标优化部署方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(2):121-127.
- [52] 喻晨龙, 谭贤四, 王红, 等. 临近空间高超声速目标探测系统构建探究[J]. 飞航导弹, 2015(12):6-9.
- [53] 余继周, 黄鹏, 曹哲. 临近空间高超声速飞行器探测雷达技术[J]. 飞航导弹, 2014(9):74-76.
- [54] WANG L D, CHEN Y H, GAO L, et al. The Radar Detecting Situation and Trend of Near Space Hypersonic Vehicle[J]. Signal Processing, 2014, 30(1):72-85.
- [55] 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.
- [56] 韩春耀, 熊家军, 张凯. 预警探测系统目标交接班需求分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(1):90-95.
- [57] 滕克难. “协同制导通道”基本概念及其应用分析[J]. 现代防御技术, 2013, 41(4):44-48.
- [58] ZHU Chenqi. Survey of Interception Strategies for Near-Space Hypersonic Vehicles[C]// 2020 International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC), Guangzhou, China: IEEE, 2020:82-86.
- [59] 李昌玺, 毕红葵, 陈辉, 等. 临近空间高超声速飞行器探测体系构建问题研究[J]. 飞航导弹, 2012(8):11-15.
- [60] MOO P W. Multiple-Input Multiple-Output Radar

- Search Strategies for High-Velocity Targets[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2011, 5(3): 256-265.
- [61] 于盈, 梁伟栋, 朱秀娟, 等. 临近空间飞行器作战对抗仿真与推演系统设计[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(12): 2584-2590.
- [62] 刘党辉, 武彦云, 尹云霞. 组网雷达对等离子体隐身导弹探测能力仿真[J]. 测控技术, 2012, 31(5): 102-105.
- [63] MENG Fanqing, TIAN Kangsheng, WU Changfei. Distributed Target Assignment Method of Phase-Array Radar Network for Detecting Hypersonic-Glide Vehicle[C]//2021 5th International Conference on Robotics and Automation Sciences(ICRAS), Wuhan,

(上接第 639 页)

- [122] 张洪波, 谢愈, 陈克俊, 等. 非惯性运动目标弹道预报技术探讨[J]. 现代防御技术, 2011, 39(6): 26-31.
- [123] 赵良玉, 雍恩米, 王波兰. 反临近空间高超声速飞行器若干研究进展[J]. 宇航学报, 2020, 41(10): 1239-1250.
- [124] 韩春耀, 熊家军, 张凯, 等. 高超声速飞行器分解集成轨迹预测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 151-158.
- [125] 李广华. 高超声速滑翔飞行器运动特性分析及弹道跟踪预报方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [126] 杨彬, 贺正洪. 一种 GRNN 神经网络的高超声速飞行器轨迹预测方法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(7): 239-243.
- [127] LI Fan, XIONG Jiajun, LAN Xuhui, et al. NSHV Trajectory Prediction Algorithm Based on Aerodynamic Acceleration EMD Decomposition[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2021, 32(1): 103-117.
- [128] 韩春耀, 熊家军. 平衡滑翔高超声速飞行器弹道预测方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(5): 120-124.
- [129] LU P. Asymptotic Analysis of Quasi-Equilibrium Glide in Lifting Entry Flight[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(3): 662-670.
- [130] 张洪波, 黄景帅, 李广华. 典型控制规律滑翔飞行器

- China: IEEE, 2021: 123-131.
- [64] 尚学刚. 基于 STK 的临近空间飞行器雷达探测仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.

### 作者简介:



罗 健 男, 1965 年出生于安徽宁国, 研究员, 主要研究方向为雷达总体技术、新体制雷达技术。

- 的轨迹预测方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 112-118.
- [131] 李世杰, 雷虎民, 周池军, 等. 基于控制变量估计的高超声速再入滑翔目标轨迹预测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(10): 2320-2327.
- [132] 王路, 邢清华, 毛艺帆. 基于升阻比变化规律的再入高超声速滑翔飞行器轨迹预测算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(10): 2335-2340.
- [133] 翟岱亮, 雷虎民, 李炯, 等. 基于自适应 IMM 的高超声速飞行器轨迹预测[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3466-3476.
- [134] 张凯, 熊家军, 李凡, 等. 基于意图推断的高超声速滑翔目标贝叶斯轨迹预测[J]. 宇航学报, 2018, 39(11): 1258-1265.
- [135] 罗艺, 谭贤四, 王红, 等. 一种高超声速飞行器攻击意图预测方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(5): 113-119.
- [136] 吴楠, 王锋, 赵敏, 等. 高超声速滑翔再入飞行器的可达区快速预测[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 1-6.

### 作者简介:



谭贤四 男, 1967 年生, 湖南新宁人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为预警监视、装备体系建设与运用。