

基于检测前聚焦的临近空间高动态飞行器雷达探测研究

许稼^① 彭应宁^② 夏香根^③ 龙腾^① 毛二可^①

^①(北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

^②(清华大学电子工程系 北京 100084)

^③(美国特拉华大学电子与计算机工程系 DE 1976)

摘要: 最近涌现的临近空间高动态飞行器存在超高速、高机动、超远程、低RCS、等离子鞘套、电离层污染、宇宙射线干扰等显著区别于常规目标的特性。基于空天地不同平台雷达临近空间高动态飞行器通用信号建模,该文提出了分布式组网、多维度、变模型、多目标、微运动、非参数化等应用的检测前聚焦雷达信号处理新方法,通过多维参数空间相参积累和能量聚焦,克服尺度伸缩、任意运动、孔径逾越、稀疏子带、跨距离、跨多普勒和跨波束等效应,有效抑制电离层污染和有源干扰,显著提高临近空间高动态飞行器的目标检测、参数测量、聚焦成像、机动跟踪、特征提取和属性识别等环节性能。该文方法适用于临近空间高动态目标也适用于探测常规雷达目标,适用于新体制雷达也适用于常规体制雷达,具备重要的学术理论价值和广阔的应用前景。

关键词: 临近空间; 高动态飞行器; 检测前聚焦; 混合分布式组网; 等离子鞘套; 多维度

中图分类号: TN951

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)03-0229-10

DOI: 10.12000/JR16148

引用格式: 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 基于检测前聚焦的临近空间高动态飞行器雷达探测研究[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 229-238. DOI: 10.12000/JR16148.

Reference format: Xu Jia, Peng Yingning, Xia Xianggen, et al.. Focus-before-detection methods for radar detection of near space high-maneuvering aircrafts[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 229-238. DOI: 10.12000/JR16148.

Focus-before-detection Methods for Radar Detection of Near Space High-maneuvering Aircrafts

Xu Jia^① Peng Yingning^② Xia Xianggen^③ Long Teng^① Mao Erke^①

^①(School of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

^②(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

^③(Department of Electronic and Computer, University of Delaware, DE 1976, USA)

Abstract: Recently emerging, high maneuvering near space targets have many characteristics that differ from conventional targets, like ultra-high speed, high-maneuverability, ultra-far range, low Radar Cross Section (RCS), plasma sheath, ionosphere layer pollution, and cosmic ray interference. Based on general signal modeling for near space targets of ground-based, airborne, and spaceborne radars, this paper proposes novel focus-before-detection methods with respect to a distributed radar network, multi-dimensions, multiple targets, micro motion, varied model, and non-parametric processing. The proposed FBD based methods can effectively suppress the strong ionosphere layer pollution and active jamming, as well as problems like the scaled effect of echoes, arbitrary motion, aperture fill time, sparse sub-band frequency synthesis, across range cell, across

收稿日期: 2016-12-19; 改回日期: 2017-01-23; 网络出版: 2017-06-15

*通信作者: 许稼 xujia@bit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61271391, 61671061), 装备预研基金(6140415010216BQ01001), 教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-13-0049)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271391, 61671061), The Advanced Project of PLA General Equipment Department Foundation of China (6140415010216BQ01001), The Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-13-0049)

Doppler cell, and across beam width. The proposed Focus-Before-Detection (FBD) based methods can remarkably improve the signal processing performance on target detection, parameter estimation, maneuver tracking, high-resolution imaging, feature extraction, and target recognition. Additionally, they are suitable for both high maneuvering near space targets and conventional targets, and can be applied for both new-generation radars and conventional targets. Therefore, the proposed FBD based methods for high maneuvering near space target detection have both important academic research value and impact a wide variety of applications.

Key words: Near space; Highly maneuvering aircraft; Focus-Before-Detection (FBD); Hybrid distributed radar network; Plasashealth; Multi-dimension

1 引言

众所周知, 20 km以下空域是飞机等航空器活动的内层空间, 而100 km以上空域是卫星等航天器运行的外层空间^[1,2]。距地20–100 km的临近空间则位于内外层空间之中, 占据了大气层中平流层大部分区域、中间层和热层的部分区域。因此, 临近空间也称为“超高空”、“近空间”、“亚轨道”或“亚太空”等^[1–6]。近年来, 各种临近空间飞行器成为发展热点, 包括飞艇、气球、高空长航时无人机、远距离滑翔式遥控飞行器等。按飞行速度, 临近空间飞行器可分为低动态飞行器和高动态飞行器两类。低动态飞行器飞行速度一般小于3马赫, 分为升力型、浮力型以及升浮一体型等。显然, 低动态飞行器由于速度慢、机动性弱, 主要适于构造防守型的侦察、导航和通信平台^[1–6]。

临近空间高动态飞行器又称为跨大气层飞行器, 能够在空气喷气区上层和低地轨道之间航行, 能以不小于3马赫、最高25马赫速度巡航或机动^[3–6], 见图1。根据动力可分为无动力型(如再入滑翔飞行器)、吸气式动力型(如高超声速巡航飞行器)、火箭动力型(如火箭动力飞行器)以及组合巡航动力型等。在临近空间低端, 空气稠密, 这种飞行器可实现有效的空气推进。在临近空间高端, 空气稀薄, 飞行器则借助超燃冲压发动机等推进技术获得极高飞行速度。这种平台能进行位置保持, 可提供大的覆盖区和长的任务时间。相对于航空器的内层空间和航天器的外层空间, 临近空间高动态飞行器存在诸多得天独厚的优势:

◇ 距地位置适中, 覆盖范围大, 对地成像观测分辨率和灵敏度高;

◇ 可轻松穿越现有各国预警探测体系, 实现全球一小时到达。

◇ 可空天自由穿梭, 安全性高, 生存能力强;

◇ 可重复使用, 成本低, 效费比高、不会造成太空垃圾。

目前, 美俄等军事强国均有临近空间发展超高速武器长期而周密的发展计划, 而美国已明显走在了世界各国的前面。美国已将临近空间飞行器引入到信息化武器装备体系建设中, 并在美国国防部《2005–2030年无人机系统路线图》中将临近空间飞行器首次列入到了无人飞行器系统的范畴^[3–7]。同时, 在Hyper-X计划支持下, 美军对超高速武器的X-43A平台的研制投入巨资。同时, 俄、法、英、德等军事强国也都积极发展临近空间高动态飞行器。为应对美国国家导弹防御计划(NMD)的发展, 俄罗斯将超高速空天武器的重点放在超高声速导弹技术上, 主要有冷计划、彩虹-D2计划、鹰计划和X-90计划等, 包括超高声速导弹、超高声速轰炸机和用于发射卫星的超高声速飞行器。法国在超高声速技术研究方面同样表现突出, 其吸气式高超声速推进研究、组合吸气发动机和普罗米修斯等计划的目标均是研制超高声速巡航导弹。德国宇航研究中心主导的SHEFEX II超高声速飞行器于2012年发射, 其初始滑翔速度达到了11马赫。英国的研发重点则是空天飞机, 正在研制的云霄塔空天飞机, 有望在2016年开始亚轨道飞行, 2020年实现商业运营。

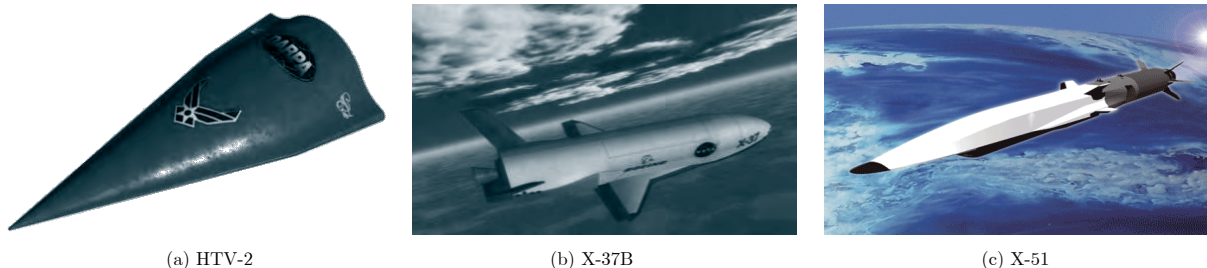


图 1 典型的临近空间高速高机动目标

Fig. 1 A typical high-speed and high-maneuvering target in near space

2 临近空间高机动目标雷达探测的挑战

目前世界各国正投入巨资，加紧研制临近空间高超声速飞行器，尤其是具有远程续航、全球一小时到达能力的临近空间高动态飞行器。由于具备全球范围快速打击潜力，其对各国安全体系提出了新挑战。面对高动态临近空间目标现实威胁，世界各国都迫切需要发展有效探测手段，构建先进的空天预警体系实现早期预警、连续跟踪、目标识别和精确拦截。从预警探测手段而言，雷达探测由于全天时、全天候、超远程、高分辨、高精度等诸多优点^[7-21]是构成远程预警探测的主要手段。然而，相对于传统雷达目标探测，超高速、高机动的临近空间高动态目标对传统雷达探测手段和方法提出了严峻挑战。具体而言，这些挑战可归结为临近空间雷达目标和环境特性如下8个方面的显著变化。

(1) 超高速

临近空间飞行器速度可达3-25马赫^[3-6]，可在瞬间穿越雷达探测的距离单元、甚至是雷达波束。因此，传统的基于距离、波束、多普勒解耦处理的信号处理方法会失效。同时，由于雷达和目标之间的高速相对运动，传统雷达回波建模中忽略的“尺度伸缩”效应^[7,22]，对于高速临近空间目标必须考虑。

(2) 高机动

与外层空间目标不同，临近空间飞行器机动过载可达到2-4 g^[3-6]，并可通过螺旋、正弦、跳跃、大拐角等诸多不规则方式实现飞行航迹的机动规避和变轨。目标的高机动特性对常规的脉间相参/非相参积累目标检测以及后续的目标连续跟踪等，均提出了严峻挑战。

(3) 小尺寸

从现有临近空间飞行器来看，其几何尺寸通常在1-20 m左右。同时由于高速的气动外形，其对典型探测波段的雷达反射截面面积(RCS)典型值为0.1-0.01 m²^[3-7]。当然，考虑目标隐身设计后，其RCS可能更小。

(4) 超远程

临近空间飞行器可在外层空间、临近空间和内层空间之间自由穿梭，可对极远距离的目标发起快速攻击。因此，为保证足够的预警时间，雷达需对数千公里，甚至更远距离之外目标实现超远程探测。

(5) 覆盖难

由于临近空间高动态飞行器发射场地要求低、可全球一小时到达，对其有效预警需要实现广域覆盖。然而，受地球曲率和遮蔽的影响，单一平台、单一体制的雷达对于临近空间目标的探测距离有限，显然难以满足探测需要。

(6) 等离子鞘套

临近空间高动态飞行器以超音速在大气层中穿梭时，飞行器高速切割大气产生高温将导致空气产生电离和电解，形成等离子体像剑鞘一样包裹在飞行器表面，这就是“等离子鞘套”现象^[7-9]，也称为“黑障”现象。由于鞘套对电磁波的吸收和折射，等离子鞘套将会缩小目标本体的RCS值，造成对目标本体探测、跟踪和识别的困难。但是，等离子鞘套自身也会产生雷达回波，且反射强度受鞘套电子浓度决定，有可能起到增强反射和改善探测的作用。实质上，“目标+鞘套”是一个“多目标”组合，鞘套必然影响了目标本体检测和参数测量。因此，迫切需要全面开展等离子鞘套对目标探测影响研究，针对性提出优化的雷达信号处理方法。

(7) 电离层污染

电离层是位于距地60-3000 km高度的区域，该层大气受太阳高能辐射及宇宙射线激励而电离，存在大量自由电子，称为电离层。电离层会对无线电波产生不确定的调制和污染，影响雷达信号的有效传播^[10-13]。由于临近空间与电离层的严重重合，必将增加临近空间高动态目标探测的难度和不确定性。具体而言，电离层对雷达信号主要存在两种性质的污染：一是，对工作于高频(HF)段的天波/地波超视距雷达(Over-The-Horizon Radar, OTHR)，由于电离层对低波段电磁波可能发生全反射和多径散射，将会在雷达回波中产生严重的杂波，这也是地波OTHR雷达在地球低纬度区域探测性能下降的主要原因。二是，由于折射、衰减、吸收、相移、时延、色散、极化旋转等效应^[10-13]，电离层对VHF, UHF, L等探测雷达常用波段的电磁波会附加随机的幅相误差和传播路径改变。其中，幅相误差将严重影响目标相参处理和聚焦成像，传播路径变化则会导致雷达目标时空参数测量精度严重下降。

(8) 宇宙射线干扰

临近空间探测雷达容易受到太空背景宇宙射线的影响。其中，宇宙射线是指来自外太空的高能带电粒子。由于临近空间接近外太空，这些高能粒子会对电磁波产生干扰。这些干扰呈突发性，具有时间短(亚秒量级)、强度大等特点，在频域会造成噪声基底整体抬高，降低雷达检测性能。此外，远程搜索雷达通常工作的VHF, UHF和L波段，也易受到通信、广播、电视和导航等无线电设备的干扰。

显然，高速、机动、远程、微弱的临近空间高动态飞行器在电离层污染、等离子鞘套和宇宙射线的影响和遮蔽下，临近空间高动态飞行器的目标和

环境特性对现有雷达信号处理在目标检测、参数估计、连续跟踪、成像识别各个环节均带来了严峻挑战,现有空中和空间雷达目标探测方法对其探测性能将急剧下降,迫切需要探索雷达探测的新机理、新体制和新方法。

3 国内外研究现状分析

临近空间高动态目标探测对雷达而言,从需求牵引和技术推动等方面均具有十分重要的意义。首先,其对于提高主权国家国土防空反导、战略预警和指挥自动化等能力意义重大。其次,在技术层面上,如何实现临近空间高动态目标的有效检测、参数估计、连续跟踪、成像识别等一体化探测,可归结为“如何有效实现高速、高机动的远程微弱目标探测”的技术难题。为克服这个难题需要从雷达体制、信号处理和系统实现等方面进行创新,对雷达信号处理领域的发展具有重要推动作用。下面对国内外相关领域的研究现状做一个简要介绍。

3.1 空间目标探测雷达研究

目前,虽然没有针对临近空间高动态目标探测的专门雷达,但针对空间目标已发展了普测型雷达、机械跟踪测量雷达及相控阵雷达等多种体制。最典型的普测型空间目标探测雷达是美海军“电子篱笆(NAVSPASUR)”。其始建于1958年,具有如下重要特点:(1)监视范围大。(2)灵敏度高,威力大。(3)监视的目标数量大。(4)定轨精度高,适于发现新目标和目标编目。但是,NAVSPASUR也存在明显缺点:(1)只能检测尺寸大于30 cm的碎片。(2)难以发现轨道倾角小于 33° 的目标。(3)没有跟踪功能,要依靠目标周期性穿越栅栏确定目标轨道。显然,由于采用守株待兔和轨道重复测量策略,普测型雷达难以实现对临近空间高动态飞行器连续探测。

为实现弹道目标探测,美国从上世纪50年代开始研制并装备多型机械跟踪雷达。例如,美国夸贾林基尔反导靶场再入测量站(KRMES)装备有4部雷达,分别是TRADEX, ALTAIR, ALCOR和MMW,覆盖从VHF到毫米波的全频段。林肯实验室空间监视方面有3部大型单脉冲雷达:Haystack, HAX和Millstone Hill。另有Goldstone雷达和Globus-II雷达及若干C波段单脉冲雷达。但是,精密机械跟踪空间观测雷达通常采用注视空间固定点的模式,对机动目标反应慢。其次,体积庞大,造价昂贵、难以机动部署和大量配置。因此,机械扫描的精密跟踪雷达也难以对付可全球发射的临近高机动目标探测需求。当前,远程相控阵雷达在空间

目标探测中承担了至关重要的作用。但是,相控阵空间雷达同样存在造价昂贵、体积庞大、难部署等问题。

在“十一五”启动的空间碎片行动计划中,我国已提出要发展普测型雷达、精密跟踪测量雷达以及相控阵雷达等空间探测雷达。虽然,现有多种雷达等均可作为临近空间目标提供探测手段。但是,由于临近空间高动态目标超高速、高机动、低RCS、超远程、等离子鞘套等显著区别于常规目标和环境的特性,常规雷达探测性能严重受限。例如,常规雷达探测通常采用波束、距离和多普勒解耦的空时级联相参处理方法(如图2所示),而超高速、高机动临近空间目标可在瞬间穿越雷达波束,必将造成目标“三跨(跨距离、跨多普勒和跨波束)”和“尺度伸缩”等现象,极大降低目标的输出信噪比。再例如,由于探测低RCS目标和超远程预警的需要,如果单纯依赖功率孔径积的提高,则雷达必然需要做得非常庞大,导致雷达成本负担过高,难以实现广域覆盖,且存在成本高、部署难、易截获、易摧毁等诸多问题。因此,开展针对临近空间高动态目标探测的信号处理方法势在必行,通过先进的信号处理技术降低单部雷达的功率孔径积,进而降低雷达组网探测成本势在必行。

3.2 空时频检测前聚焦技术

现有雷达大多采用空时级联的常规信号处理流程(如图2所示)。首先,雷达通过阵元间的相参积累实现波束形成和能量指向,而时域的脉冲压缩和MTD处理分别实现回波能量在脉内和脉间的相参积累。上述级联处理可引入自适应机制灵活抑制杂波、干扰和噪声等对目标检测的影响。进而,雷达通过CFAR处理实现目标点迹的自动提取。同时,宽带相参雷达可通过运动补偿获取目标高分辨率图像^[19-21,23-28]为后续目标识别提供输入。然而,上述流程也隐含了雷达高性能处理的前提:在回波处理和能量积累时,目标回波分布应尽可能局限于一个解耦的波束-距离-多普勒的3维单元中,否则,将严重影响目标能量积累水平和检测性能^[29]。随着对上述框架应用限制的逐步认识,人们在级联式处理基础上引入了Hough变换(HT)^[30-32]、动态规划(DP)^[33,34]和Bayes递推^[35,36]等方法在跨距离单元(ARC)和跨多普勒单元(ADC)条件下实现回波的非相参积累。上述方法在确认目标点迹同时,也给出了积累期间目标航迹的跟踪信息。因此,人们将基于HT, DP和Bayes递推等实现检测和跟踪一体化的方法^[23-43]通称为检测前跟踪(Tarck-Before-Detection, TBD)。

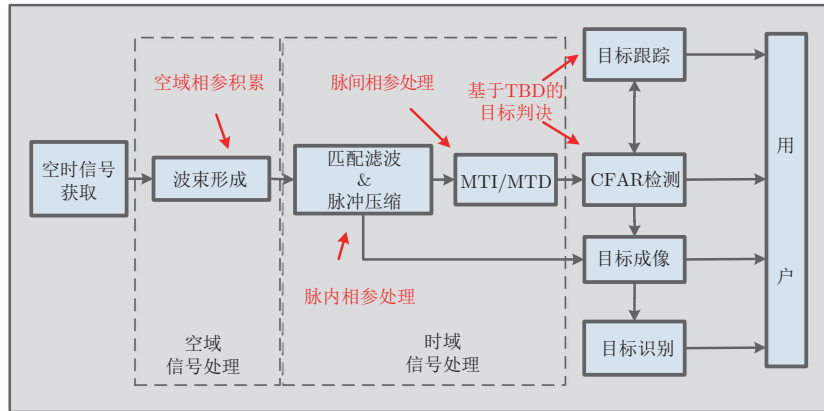


图2 常规雷达信号处理框图

Fig. 2 Conventional radar signal processing block diagram

上述基于TBD的级联式信号处理流程虽然能满足雷达对常规目标的探测需求，但对于临近空间高动态目标探测则会捉襟见肘、性能不佳。首先，为尽量避免目标“三跨”对检测性能的损失，现有雷达通常采用“短时间”处理实现空间目标探测。但是，由于短时间的积累增益受限，为实现小RCS和超远程的高动态目标探测必然会加剧对雷达对“功率孔径积”的需求。其次，现有的TBD方法虽然能够实现ARC的校正和积累，但是，由于TBD通常实现多脉冲非相参积累，积累效率有限。尤其是，非相参积累存在“SNR阈值”效应，初始信噪比(SNR)很低时基本没有积累增益。因此，小RCS、超远程临近空间高动态目标造成的低SNR将会严重限制TBD的应用效果。第三，临近空间高动态目标超的“尺度伸缩”现象将导致现有匹配滤波和脉冲压缩性能的急剧下降。第四，对于采用螺旋、正弦、跳跃、大拐角方式机动的高动态目标，现有TBD方法很容易发生“目标失跟”，致使目标检测性能急剧下降。第五，难以实现发生“等离子鞘套”情况下目标本体和鞘套间的有效分辨。第六，现有长时间相参积累方法^[37-42]通常难以补偿机动目标的高阶运动。

针对上述不足，我们2011-2012年在国际雷达领域权威期刊《IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems》以“三篇系列”长文提出了Radon-Fourier变换(RFT)和广义Radon-Fourier变换(GRFT)等雷达信号处理新方法^[43-45]。针对存在“三跨”现象的目标回波，RFT/GRF通过“多维度联合相参积累”可将长时间相参积累问题转换为参数化的模型匹配问题。例如，对于匀速径向运动目标，目标初始距离和径向速度决定了目标在相参积累期间的ARC特性，也决定了回波多普勒起伏。因此，雷达可通过RFT联合补偿距离走

动和多普勒起伏实现长时间的相参积累。同时，RFT和GRFT的相参积累结果也在变换的参数空间中形成了目标的“多维聚焦图像”。与现有检测前跟踪(TBD)技术相比，我们将课题组提出的长时间相参积累方法统一命名为“检测前聚焦(FBD)”技术^[46-49]。2011年至今，课题组围绕FBD的空时频多域联合处理、快速算法、盲速旁瓣抑制、最大似然估计、尺度效应补偿、MIMO雷达分集检测、多目标分辨等相关问题提出了时空RFT(ST-RFT)、频率柜RFT(FBRFT)、宽带尺度RFT(WSRFT)等一系列检测前聚焦新方法，完整推导了不同雷达机动目标高阶运动参数估计的最大似然估计及其CRB界^[50-56]。2016年，IEEE Aerospace and Electronics Systems Society的Radar Systems Panel主席M. S. Greco教授特邀课题组以“Focus-Before-Detection Radar Signal Processing (I): Challenges and Methods”和“Focus-Before-Detection Radar Signal Processing (II): Recent Developments”为题以两篇“系列综述”^[22,55]在雷达领域国际权威期刊《IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine》上介绍FBD方法的原理和最新进展。

4 基于FBD的临空目标检测研究展望

4.1 混合分布式临近空间目标探测网络体系构建

相对在轨的空间目标，临近空间目标轨迹机动、覆盖范围广、探测盲区大，必须提出有效的雷达体制解决其空间覆盖问题。为此，采用空天地一体、主被动复合的“混合分布式组网”概念是解决临近空间高机动目标检测的必然选择。其中，“混合”体现在雷达信号源可是主动天基、地基、机载、球载探测雷达平台，也可是通信、广播、电视等非合作外辐射源。通过解决时空同步、长时间积累

等关键难题,实现临近空间高机动目标的无缝覆盖探测。“分布式”在于充分发挥空、天、地多平台雷达探测的优势,构建临近空间高动态目标探测的雷达立体网络,以现有常规地基雷达组网为基础,发挥机载雷达、OTHR雷达的骨干节点作用,同时采用临近空间低动态或悬停飞艇、气球作为补充平台。

4.2 临近空间高动态目标空时频信号建模

对临近空间高动态目标有效运用FBD方法前提在于对信号进行准确的建模。针对混合分布式雷达组网包括的大型相控阵雷达、OTHR雷达、球载雷达、外辐射源雷达等不同体制和类型的雷达,建立在杂波和干扰背景下临近空间高动态飞行器的信号模型。进而,深入研究由运动状态扰动、视角变化、雷达系统失稳、等离子鞘套等造成的目标回波幅相起伏,获取相参积累的极限视角差、积累时间和积累带宽的定量估计,为后续空时频FBD处理奠定基础。

4.3 临近空间高动态目标空时频检测前聚焦新方法

围绕高速高机动的临近空间高动态飞行器的有效探测,检测前聚焦方法可以在如下6个方面的提出针对性的新方法。具体如下:

(1) 变尺度

基于课题组先期提出的WSRFT方法,深入分析实际临近空间目标探测雷达的信号脉宽、带宽等参数,定量分析临近空间飞行器超高速、高机动等特性对回波尺度的影响。提出优化的“变尺度”新方法,联合补偿目标高速运动和高阶运动对回波产生的尺度伸缩,显著降低超高速和高机动对目标相参积累的损失。

(2) 多维度

针对现有方法对实际3维运动的临近空间高动态飞行器存在的模型失配和性能损失,通过距离-方位和距离-方位-俯仰等多维度建模,提出更加准确的信号模型和基于多维度联合处理的检测前聚焦新方法,降低现有方法因模型失配导致的性能损失和额外运算量。

(3) 变模型

高动态目标运用螺旋、正弦、跳跃、大拐角等诸多不规则方式在临近空间自由穿梭,通常难以采用单一的运动模型对目标进行建模。基于“变模型”的检测前聚焦技术实现对高机动目标运动匹配,实现多模型间的自适应切换和匹配,进而通过对变模型信号的相参处理,显著改善临近空间高动态飞行器的探测性能。

(4) 微运动

临近空间高动态目标存在的振动、旋转、进动

和章动等微动特征可能构成高动态目标的识别和辨识的基础,但是其小RCS、超远程等特性严重制约了现有微动提取方法的性能。将微动与FBD方法的结合,可提出“微动FBD”新方法显著改善微动特征的提取的精度和适应性。

(5) 非参数化处理

电离层对于高速穿梭的临近空间高动态目标不可避免存在幅相调制和污染,将严重影响FBD方法的相参处理性能。为此,通过“非参数化”处理,检测前聚焦方法可高效地实现克服电离层污染和目标高阶运动的影响,显著提高处理效率。

(6) 多目标

根据等离子鞘套中电子浓度的不同,目标本体和鞘套可能表现出类似于多目标编队特性。检测前聚焦方法可结合“多目标”方法实现目标本体和等离子鞘套的分离。通过构造优化的检测和估计的统计量,实现检测和参数估计一体化处理,联合获取目标本体和等离子鞘套的位置参数(距离、方位、俯仰)和运动参数(速度、加速和加加速度等)的优化估计,精度逼近CRB界,显著改善对目标本体的探测性能。

4.4 组网协同融合检测与跟踪技术

基于临近空间高动态目标混合分布式探测网络体系构建,检测前聚焦方法需要研究不同体制雷达高精度时空配准与同步,提出检测级、位置级、属性级、态势级和威胁估计级的稳健多源信息融合准则,显著提高协同探测威力,并改善目标检测、估计、跟踪、成像、识别综合性能。另外,高速高机动微弱目标跟踪一直是目标跟踪领域研究重点和难点,可着重研究空、天、地多雷达探测下临近空间高动态目标跟踪关联和滤波的有效方法。同时,可研究基于FBD检测估计一体化处理获取目标位置和运动参数,显著改善高机动目标跟踪性能。

4.5 通用临近空间目标试验验证

为验证检测前聚焦方法在临近空间目标探测中的有效性,需要系统全面地开展参数化雷达信号处理新理论和新方法的试验研究,搭建通用临近空间高机动目标信号处理集成演示系统。针对不同雷达平台,仿真演示新方法有效性。进而,通过不同场景的大量仿真数据充分验证本文提出的检测、估计、跟踪、成像以及识别新方法对临近空间高动态目标的有效性。同时,需要通过实测数据验证本文提出的临近空间高动态目标探测新方法的有效性。

5 总结与展望

基于创新的FBD处理方法,我们展望针对临近空间高动态目标,新一代的雷达信号处理可采用如

图3所示的“多维联合相参处理”实现更为先进和优化的雷达信号处理。首先，新体制雷达可基于回波中杂波、干扰和目标等探测要素的精细感知，在GPS, RS, GIS和ADS-B等辅助信息的支持下，通过对功率、孔径、频率、时间、波形和极化等雷达探测资源的管理和优化，对临近空间高动态目标探

测的重点方向、重点时刻、重点频段合理配置优化探测资源。进而，通过基于FBD先进的雷达信号处理方法实现有效探测。总之，FBD雷达信号处理理论和方法通过多维度联合相参处理可显著提高雷达威力和探测性能，为临近空间高动态目标有效探测奠定创新的理论和技术基础。

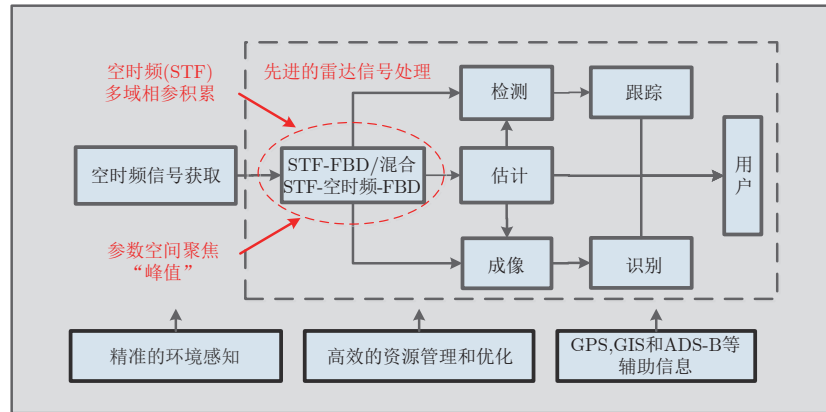


图 3 检测前聚焦雷达信号处理框图

Fig. 3 FBD based radar signal processing block diagram

参 考 文 献

- [1] 杨学军, 张望新. 优势来自空间[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [2] 李荣常, 程建, 郑连清. 空天一体信息作战[M]. 北京: 军事科学出版社, 2003.
- [3] 冯坤菊, 王春阳. 临近空间与空间作战[J]. 飞航导弹, 2009(3): 32-34.
- [4] 王胜开, 全寿文, 李淑华, 等. 临近空间和临近空间飞行器[J]. 现代军事, 2008(7): 36-39.
- [5] 张宇. 美军HTV-2成功数次机动并达到20倍音速[N]. 环球时报, 2010-04-29(08).
- [6] 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.
Dai Jing, Cheng Jian, and Guo Rui. Research on near-space hypersonic weapon defense system and the key technology[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2010, 21(3): 58-61.
- [7] 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, 35(6): 713-719.
Yu Zhe-feng, Liu Jia-qi, Liu Lian-yuan, et al. Research on the RCS characteristics of hypersonic near space vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(6): 713-719.
- [8] 李江挺, 郭立新, 方全杰, 等. 高超声速飞行器等离子鞘套中的电磁波传播[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(5): 969-973.
Li Jiang-ting, Guo Li-xin, Fang Quan-jie, et al. Electromagnetic wave propagation in plasma sheath of hypersonic vehicles[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(5): 969-973.
- [9] 赵良, 刘秀祥, 苏汉生. 高超声速飞行器等离子鞘套相关问题研究与展望[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 28-32.
Zhao Liang, Liu Xiu-xiang, and Su Han-sheng. Study and prospect on some issues of plasma sheath of hypersonic vehicle[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2015, 36(5): 28-32.
- [10] 刘传保. 电离层对雷达测量精度的影响及校正方法研究[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(2): 47-49, 53.
Liu Chuan-bao. The effects of ionosphere to radar measurement precision and the correction methods[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(2): 47-49, 53.
- [11] Franke S J, Liu C H, and Fang D J. Multifrequency study of ionospheric scintillation at Ascension island[J]. *Radio Science*, 1984, 19(3): 695-706.
- [12] Emardson R, Jarlemark P, Johansson J, et al. Spatial variability in the ionosphere measured with GNSS networks[J]. *Radio Science*, 2013, 48(5): 646-652.
- [13] Quegan S and Lamont J. Ionospheric and tropospheric effects on synthetic aperture radar performance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(4): 525-539.
- [14] Barton D K. Radar System Analysis and Modeling[M]. Norwood, Mass, USA: Artech House, 2004.
- [15] Brookner E. Aspects of Modern Radar[M]. Norwood, Mass, USA: Artech House, 1988.
- [16] Nathanson F E, Reilly J P, and Cohen M N. Radar Design Principles: Signal Processing and the Environment[M]. Second Edition, Mendham, New Jersey: SciTech Publishing,

- Inc., 1999.
- [17] Van Trees H L. Detection, Estimation, and Modulation Theory: Part IV of Optimum Array Processing[M]. New Jersey, USA: Wiley, 2002.
- [18] 吴曼青. 数字阵列雷达及其进展[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(1): 11–16.
Wu Man-qing. The development of digital array radar[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2006, 1(1): 11–16.
- [19] 王永良, 彭应宁. 空时二维自适应处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [20] 何友, 关键, 彭应宁, 等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [21] 何友, 修建娟, 张晶炜, 等. 雷达数据处理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [22] Xu J, Yu J, Peng Y N, *et al.* Space-time radon-Fourier transform and applications in radar target detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(9): 846–857.
- [23] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [24] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.
- [25] Cumming L G, Wong F H, 洪文, 等. 合成孔径雷达成像-算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Cumming L G, Wong F H, Hong Wen, *et al.* Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [26] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19–27.
Yang Jian-yu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 19–27.
- [27] Jakowatz C V Jr, Wahl D E, Eichel P H, *et al.* Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Boston, USA: Springer, 1996.
- [28] Du Lan, Liu Hong-wei, Bao Zheng, *et al.* A two-distribution compounded statistical model for radar HRRP target recognition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(6): 2226–2238.
- [29] Li Neng-jing and Zhang Yi-ting. A survey of radar ECM and ECCM[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(3): 1110–1120.
- [30] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform. I. System concept[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 102–108.
- [31] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform. II. detection statistics[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 109–115.
- [32] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform. III. Detection performance with binary integration[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 116–125.
- [33] Tonissen S M and Bar-Shalom Y. Maximum likelihood track-before-detect with fluctuating target amplitude[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 796–809.
- [34] Barniv Y and Kella O. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets Part II: Analysis[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, AES-23(6): 776–788.
- [35] Boers Y and Driessen H. Particle filter track-before-detect application using inequality constraints[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(4): 1481–1487.
- [36] Boers Y and Driessen J N. Multitarget particle filter track before detect application[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2004, 151(6): 351–357.
- [37] Perry R P, Dipietro R C, and Fante R L. Coherent integration with range migration using Keystone formatting[C]. Proceedings of 2007 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA, 2007: 863–868.
- [38] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Asensio-Lopez A, *et al.* A coherent Radon transform for small target detection[C]. Proceedings of 2009 IEEE Radar Conference, Pasadena, CA, USA, 2009: 1–4.
- [39] Tao R, Zhang N, and Wang Y. Analysing and compensating the effects of range and Doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 12–22.
- [40] Yu Ji, Xu Jia, and Peng Ying-ning. Upper bound of coherent integration loss for symmetrically distributed phase noise[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2008, 15: 661–664.
- [41] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, Yang Dong, *et al.* A new method for radar high-speed maneuvering weak target detection and imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1175–1179.
- [42] Xing Meng-dao, Su Jun-hai, Wang Gen-yuan, *et al.* New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 214–224.
- [43] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection, I: Generalized Doppler filter bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186–1202.
- [44] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier

- transform for radar target detection (II): Blind speed sidelobe suppression[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2473–2489.
- [45] Yu Ji, Xu Jia, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection (III): Optimality and fast implementations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 991–1004.
- [46] Xu Jia, Yu Ji, Peng Ying-ning, *et al.* Focus-before-detect for radar target detection[C]. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, China, 2011: 430–433.
- [47] Xu J, Peng Y N, Xia X G, *et al.* Focus-before-detection radar signal processing (I): Challenges and methods[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* (in press).
- [48] Xu J, Peng Y N, Xia X G, *et al.* Focus-before-detection radar signal processing (II): Recent developments[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* (in press).
- [49] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 空时频检测前聚焦雷达信号处理方法[J]. *雷达学报*, 2014, 3(2): 129–131.
Xu Jia, Peng Ying-ning, Xia Xiang-gen, *et al.* Radar signal processing method of space-time-frequency focus-before-detects[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 129–131.
- [50] Xu Jia, Zhou Xu, Qian Li-chang, *et al.* Hybrid integration for highly maneuvering radar target detection based on generalized radon-Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(5): 2554–2561.
- [51] Xu Jia, Xia Xiang-gen, Peng Shi-bao, *et al.* Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(12): 6190–6201.
- [52] Xu Jia, Dai Xi-zeng, Xia Xiang-gen, *et al.* Optimizations of multisite radar system with MIMO radars for target detection[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2329–2343.
- [53] Qian L C, Xu J, Xia X G, *et al.* Fast implementation of generalised Radon-Fourier transform for maneuvering radar target detection[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(22): 1427–1428.
- [54] Peng Shi-bao, Xu Jia, Xia Xiang-gen, *et al.* Multi-aircraft formation identification for narrowband coherent radar in a long coherent integration time[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 2121–2137.
- [55] Qian Li-chang, Xu Jia, Xia Xiang-gen, *et al.* Wideband-scaled Radon-Fourier transform for high-speed radar target detection[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(5): 501–512.
- [56] Xu Jia, Teng Long, Liu Feng, *et al.* Radar target imaging using three-dimensional space Radon-Fourier transform[C]. Proceedings of 2014 International Radar Conference 2014, Lille, France, 2014: 1–6.

作者简介



许稼(1974–2017), 男, 安徽绩溪人, 北京理工大学教授, 博士生导师。中国电子学会会士、英国电子工程学会会士、国际电气与电子工程学会高级会员。研究领域包括高分辨率成像、检测与估计、多源信息融合、电磁态势仿真、混沌非线性等。承担国家重大专项、国家863重点、国家自然科学基金等项目40余项, 申请国家发明专利45项, 获清华大学优秀博士后奖, 国家科技发明二等奖1项, 入选北京理工大学杰出中青年教师和教育部新世纪优秀人才支持计划。发表学术论文200余篇, 其中SCI收录45篇, EI收录100余篇。担任中国电子学会学术工作委员会委员、担任《Electronics Letters》、《Science in China》、《Chinese Journal of Electronics》、《电子学报》、《现代雷达》、《雷达科学与技术》、《雷达学报》等期刊编委。



彭应宁(1939–), 男, 四川郫县人, 清华大学电子工程系教授, 博士生导师。研究领域包括谱估计、自适应滤波、阵列信号处理、雷达信号处理、微光图像信号处理等。获国家科技发明二等奖1项, 国家科技进步二等奖和三等奖各1项, 省部级科技进步奖14项, 光华科技进步一等奖1次, 申请国家发明专利30余项, 出版学术专著4部, 译著3部, 发表学术论文256篇, 其中被SCI等检索200余篇。担任国务院学位委员会“信息与通信工程学科”评议组成员, 欧洲SAR学会国际科学委员会委员, 中国电子学会会士, 中国雷达学会副主任。



夏香根(1963-), 男, 江苏高淳人, 美国特拉华大学教授、教育部长江学者讲座教授、美国电气和电子工程师协会会员(IEEE Fellow)。1983年、1986年和1992年分别获得南京师范大学学士学位, 南开大学硕士学位和美国南加州大学博士学位。1995年-1996年在美国加州休斯研究实验室任高级研究员。研究领域包括空时编码、MIMO和OFDM通讯系统、数字信号处理、SAR和ISAR成像等。在国际期刊上发表论文160多篇, 并拥有7项美国专利, 出版了专著《Modulated Coding for Intersymbol Interference Channels (New York, Marcel Dekker, 2000)》(码间干扰信道的调制码)。1997年曾荣获美国国家自然科学基金的Faculty Early Career Development (CAREER) Program奖, 1998年获得The Office of Naval Research (ONR) Young Investigator奖, 2001年荣获了中国国家自然科学基金委的杰出海外青年奖, 同年还荣获了美国特拉华大学的杰出青年教师奖。担任《IEEE Transactions on Wireless Communications》, 《IEEE Transactions on Vehicular Technology》, 《IEEE Signal Processing Letters》, 《Journal of Communications》(JCM), 以及《Journal of Communications and Networks》(JCN)等国际知名学术期刊的副主编。



龙 腾(1968-), 男, 湖北黄陂人, 北京理工大学教授, 博士生导师。现任信息与电子学院院长、雷达技术研究所所长。1999年美国Stanford大学电气工程系任客座副教授; 2002年英国University College London 电气工程系任高级访问学者。教育部“新体制雷达与实时信息处理”创新团队带头人。担任英国工程技术学会会士(IET Fellow)、IEEE宇航电子学会雷达专业委员会委员、北京电子学会雷达专业委员会主任委员、中国电子学会信号处理分会副理事长、中国航空学会信号处理分会副理事长、中国航空学会电子分会副理事长。曾获北京十大杰出青年称号、获国家科技发明二等奖1项、国防和军队科技进步一等奖1项、二等奖5项、三等奖1项, 发明专利80余项。发表学术论文200余篇, 其中3大检索收录论文近100篇; 出版学术著作2部。



毛二可(1934-), 男, 北京市人, 中国工程院院士, 北京理工大学教授, 博士生导师。北京理工大学学术委员会委员, 任北京电子学会常务理事, 总装备部科技委兼职委员、空军科学技术与人才培养顾问。长期从事雷达系统及其信号处理方面的教学和科研工作。在雷达体制和杂波抑制方面取得重大的科研成果, 先后主持和参加了30多项重点科研任务。在雷达系统及其信号处理和教书育人方面做出了创造性的贡献。研究成果曾获光华科技基金特等奖, 国家发明一等奖1项、二等奖2项、三等奖2项、四等奖1项, 部级奖多项。1984年获准为“有突出贡献的中青年技术专家”, 1985年和1988年两次被评为北京市劳动模范, 1989年评为全国先进工作者, 1991年评为兵器工业系统劳动模范, 2007年评为全国优秀共产党员。