

雷达抗有源干扰技术现状与展望

唐斌 赵源 蔡天一 冉智 唐娟 熊英

(电子科技大学电子工程学院, 成都, 611731)

摘要: 雷达有源干扰为雷达目标检测、跟踪与识别带来了极大挑战,使得复杂电磁环境下雷达抗有源干扰技术研究迫在眉睫。雷达抗有源干扰技术囊括雷达信号与信息处理各个环节,是一项系统综合技术。本文从系统与体制层面、波形设计与接收机层面以及信号与数据处理层面层次化地综述了雷达抗有源干扰理论及其关键技术,着重介绍了代表性成果及其最新进展,评述了其中的公开问题,对研究中现存的难点进行了探讨。随后简述了现有雷达抗有源干扰效能评估方法及其不足。以此为基础,对现有部分方法存在的限制给出了可行的解决思路。最后本文展望了未来抗有源干扰的发展方向。

关键词: 雷达有源压制干扰; 雷达有源欺骗干扰; 雷达抗干扰

中图分类号: TN95 文献标识码: A

Advances and Perspectives in Radar ECCM Techniques of Active Jamming

Tang Bin, Zhao Yuan, Cai Tianyi, Ran Zhi, Tang Juan, Xiong Ying

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731, China)

Abstract: Radar active jamming brings a huge challenge for radar target detection, tracking and identification. This makes the development of radar electronic counter-counter measurements(ECCM) against active jamming urgent. The ECCM techniques concern about every procedure of Radar. This paper reviews the ECCM techniques including system design, waveform design, antenna design, signal processing and data processing. The latest developments of relative algorithms are discussed, and several major problems as well as the existing obstacles in Radar ECCM are introduced. The performance evaluation methods and their shortage are also briefly introduced. The feasible solutions to overcome these obstacles are given accordingly. In the end, the perspective and application of radar ECCM against active jamming are proposed.

Key words: active blanket jamming; active deceptive jamming; radar ECCM

引 言

雷达电子对抗技术(Electronic counter measurements, ECM)的发展使军用雷达面临新的挑战。随着超大规模集成电路与固态电路等技术的发展,有源干扰表现出高功率、高逼真度及高智能化等特征,使雷达工作电磁环境变得更加恶劣,雷达的生存面临巨大威胁。在此背景下,雷达系统对于抗有源干扰方法的需求日益提高。雷达有源干扰由干扰方辐射源主动辐射能量干扰雷达工作,主要包括有源压制

干扰和有源欺骗干扰。有源压制干扰通过发射高功率随机信号,在时域、频域及变换域上掩盖目标回波,破坏雷达信息获取的能力。如果压制类干扰的功率足够大,超过雷达接收机的处理能力,则可以导致雷达完全瘫痪,失去作战能力。有源压制干扰主要表现形式包括射频噪声干扰、阻塞干扰、瞄频干扰、扫频干扰、梳状谱及灵巧噪声干扰。数字射频存储技术(Digital radio frequency memory, DRFM)的发展进一步推动了有源欺骗干扰的实施。本文将有源欺骗干扰分为常规有源欺骗干扰和密集假目标干扰。常规有源欺骗干扰包括距离假目标干扰和速度假目标干扰、距离-速度联合假目标干扰。通过在多个脉冲重复周期调制与真实目标行为类似的时延和多普勒频率可以产生距离波门拖引干扰(Range gate pull off, RGPO)、速度波门拖引干扰(Velocity gate pull off, VGPO)以及距离-速度联合波门拖引干扰(Range-velocity gate pull off, R-VGPO)可有效对抗跟踪雷达。密集假目标干扰兼具有源欺骗干扰和有源压制干扰的优点,该干扰样式主要通过干扰机对截获的雷达发射信号全脉冲或部分脉冲在时域重复转发,在一个脉冲重复周期甚至在一个脉宽内形成密集的假目标,使雷达数据处理饱和。典型密集假目标主要表现为密集转发干扰。此外,间歇采样干扰^[1]、切片组合(Chopping and interleaving, C&I)和频谱弥散(Smeared spectrum, SMSF)干扰^[2]等新体制干扰可用来对抗线性调频(Linear frequency modulation, LFM)雷达。作者认为,假目标和真实目标在时域、频域的分布通常存在以下两种情况:(1)假目标和真实目标落在不同距离/速度波门内;(2)假目标与真实目标落在相同的距离/速度波门内,且假目标与真实目标时延差/频率差大于雷达距离分辨率/多普勒分辨率。对于第一种情况,干扰和目标回波通常可分,可首先进行干扰感知,然后通过门控技术将所识别到的假目标剔除;对于第二种情况,干扰和目标回波通常是多域重叠的,此时难以进行干扰感知。随着电磁环境日趋恶化,该情况势必成为未来抗干扰研究的重心。

在雷达发展初期,抗有源干扰技术作为雷达探测的附属没有得到足够的重视。雷达主要通过频率捷变、旁瓣对消等被动响应手段进行抗干扰。随着信息技术的发展,以雷达信号处理与数据处理为代表的主动响应手段有效地提高了雷达抗有源干扰能力。已有专著对抗有源干扰单项技术的工程实现给出了较为详细的说明^[3,4]。雷达抗有源干扰既是一个工程问题也是一个理论问题,覆盖雷达信号与信息处理的多个方面,是一项系统综合技术。随着信号处理技术的发展与硬件水平的提升,雷达抗干扰能力将会获得进一步提高。本文从雷达系统的不同层面出发,综述了系统与体制层面抗干扰、波形设计与接收机层面抗干扰、信号与数据处理层面抗干扰及抗有源干扰效能评估的最新理论成果及其应用,描述了国内外的研究进展,讨论了其中的公开问题,最后展望了未来的研究方向。

1 系统与体制层面抗干扰

1.1 系统设计层面抗干扰

通过系统设计避免干扰进入雷达,是一种简单可行的抗有源干扰途径。相关研究可以追溯到20世纪30年代。受理论发展限制,对于功能、结构相对简单的雷达系统,雷达接收机带宽较窄,且目标多服从点态模型。此时,系统层面抗干扰具有一定的效果。系统层面抗有源干扰措施主要包括:(1)对于大功率饱和干扰,可通过调整接收机信号动态范围防止出现饱和状态。相关的方法主要包括时间灵敏度控制、自动增益控制、快时间常数以及宽限窄接收机等技术^[5],但该类方法将影响雷达灵敏度和线性特性。(2)干扰机在截获新的雷达脉冲前无法预知雷达参数的变化,可采用重频抖动、重频捷变和频率捷变等技术避开干扰所在频段。这类抗干扰措施也可有效地对抗距离/速度波门前拖干扰。然而,现代干扰机反应时间更短,频率覆盖范围更宽,该类方法将失效。(3)旁瓣匿隐(Sidelobe blank, SLB)及旁瓣对消(Sidelobe cancellation, SLC)^[4]通过设置辅助天线及辅助接收通道,估计干扰信号波形或干扰来波方向,可以进行干扰抑制,但该类方法对于从主瓣进入的干扰无能为力。(4)脉冲体制雷达也具有一定的抗干扰能力,对脉冲多普勒(Pulse Doppler, PD)雷达,可采用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform,

FFT)进行目标多普勒分析,实现在时间和多普勒轴上对目标信号的二维处理,若假目标的距离和速度不匹配,则由二维跟踪可以容易地剔除假目标。此外,单脉冲技术的应用使得传统的针对圆锥扫描体制依靠幅度调制来产生角度欺骗干扰的方法对单脉冲雷达完全失效。(5)跟踪雷达通常装备干扰检测器检测噪声调制类干扰存在,通过在感兴趣的目标两侧设置波门,干扰检测器可以触发雷达系统转入干扰跟踪模式;前沿跟踪技术被专门用于对付距离波门后拖干扰;当精确的距离信息并非重要参数时(如目标指示雷达),可采用保护波门技术,待假目标信号移开后,系统会重置波门并维持对感兴趣目标的跟踪。系统设计层面抗干扰核心思想为提高雷达检测概率,当干扰为高斯、平稳和线性时具有一定的效果,而在大功率压制干扰、密集假目标干扰等情况下,该类措施将无能为力。

1.2 新体制雷达

新体制雷达的出现使得干扰进入雷达接收机的概率进一步降低,新体制雷达通过提高系统复杂度,在提高雷达性能的同时兼具抗干扰潜力。早期出现的双/多基雷达本身具有较强的抗有源干扰能力,然而时间、空间同步的瓶颈限制其进一步发展;文献[5]提出了一种在欺骗干扰环境下利用自适应相控阵技术进行目标跟踪的算法;文献[6]研究了随机噪声图像雷达的抗干扰能力;文献[7]通过多通道的合成孔径雷达(Synthetic aperture Radar, SAR)图像实现欺骗干扰的抑制,通过成像雷达图像匹配抗干扰是一种抗有源欺骗干扰较为有效的思路;分布式 MIMO (Multiple input multiple output)雷达由于其较低的发射波形截获概率,亦具有较强的抗干扰能力。在此基础上,文献[8]利用频率分集阵列(Frequency diversity array, FDA)提出了一种基于 MIMO-FDA 的自适应对消技术,进一步推动了新体制雷达抗干扰的研究进程。认知雷达^[9,10]具有环境感知与学习推理决策能力,是近年来新体制雷达研究的另一热点。认知雷达通过实时频谱分析,利用环境参数综合决定是否改变工作参数,有效地避开干扰频段,提高雷达的抗干扰能力,并降低雷达被发现和攻击的可能性。作为认知雷达的扩展,认知雷达网能够分析干扰环境,自适应地切换系统工作模式,如采用单基发射多基接收、多基收发分置等体制,从根本上避免了雷达网受到干扰的可能。

1.3 天线极化抗干扰

有源干扰极化状态由干扰机天线的极化方式决定,干扰天线极化方式通常与雷达天线极化方式不同,为利用极化信息抗有源干扰提供了理论前提。文献[11]在 20 世纪 70 年代首先提出了自适应极化对消器的概念及系统实现方案,开启了极化抗有源干扰这一新研究领域。在国内相关研究中,国防科技大学在雷达极化抗干扰方面处于领先地位。抗有源压制干扰方面,国内外学者主要从极化滤波器设计展开研究。文献[12~18]分别从最大信干噪比准则、输出干扰功率最小、输出目标信号功率最大以及输出信干噪比最大等角度研究了极化滤波的最优化问题。最优极化滤波方法需要先验已知目标回波和干扰的极化参数,然而这些参数通常需要估计得到。文献[19]研究了针对干扰抑制和目标匹配的联合处理问题,提出了干扰背景下的收发最优极化求解方法。文献[20~23]分别针对高频地波雷达和典型抛物面天线,研究了频域-极化域的联合滤波方法。在此基础上,多域滤波成为了极化抗有源压制干扰的新思路。抗有源欺骗干扰方面,国内学者利用假目标与真实目标在极化特性上的差异开展有源假目标干扰感知与抑制方法研究。文献[24~26]分析有源欺骗干扰和目标回波在极化域的瞬态散射矩阵差异,分别通过极化滤波和极化投影进行干扰抑制;文献[27]采用交叉极化阵列进行干扰抑制,在降低设备量的同时保持较高抗干扰性能;文献[28]利用干扰和目标回波散射矩阵差异,采用盲分离抑制干扰;文献[29~31]分别利用目标与固定极化假目标干扰在散射特性上的差异,干扰信号和目标回波的瞬态极化投影矢量在脉间的变化规律,真假目标极化散射矩阵的奇异性差别,实现了真/假目标的有效鉴别;文献[32]研究了基于极化编码的有源假目标干扰鉴别方法。

极化抗干扰通过有源干扰与目标回波极化方式差异进行抗干扰,具有较强的稳健性,相关技术日趋

成熟,主要应用于对空监视、导弹制导及成像雷达。然而,限制其发展的主要因素在于实施条件较为苛刻。特别地,当干扰方采用全极化发射天线时,抗干扰性能将有所下降。此外,针对于宽带雷达的极化抗干扰应用尚未展开广泛研究。

1.4 雷达组网抗干扰

雷达组网通过将多部不同体制、不同工作参数的雷达利用信息融合技术进行目标检测、跟踪、鉴别。布站方式灵活、频段丰富等优势使该体制具有很强的抗有源干扰潜力。文献[33]开创性地研究了组网雷达中的抗干扰技术;文献[34]基于定量分析的非线性规划模型,利用不同频率、不同体制的雷达组网进行干扰抑制;文献[35]采用超混沌正交多相编码信号对抗针对 SAR 组网雷达的欺骗式干扰;文献[36]针对密集假目标干扰,从优化相控阵调度角度提出了几项抗干扰措施,可有效降低计算量;文献[37]从数据融合的角度分析了网络化雷达抗有源干扰潜力。此外,还有大量的文献从雷达网信号处理及信息融合的角度研究其抗干扰措施。然而,雷达组网抗干扰的工程化应用仍存在限制。一方面,时间校准和空间对齐仍是数据融合领域亟需解决的问题之一,由该问题衍生的雷达网协同探测理论尚未完善;另一方面,现代有源干扰技术的发展使得网对网的智能化干扰成为可能,文献[38~40]讨论了协同干扰对抗对空情报雷达网,即通过干扰机的协同运动来欺骗雷达网;最后,干扰机的小型化使得灵巧干扰更易于实现,在空域分散分布的小型干扰机可发射覆盖各个频带的有源干扰信号,给抗干扰带来挑战。

2 波形设计与接收机层面抗干扰

2.1 发射波形管理抗干扰

国外学者对发射波形管理抗有源欺骗干扰开展了少量研究,文献[41]通过频率选择进行欺骗干扰的抑制;文献[42]假设距离波门拖前干扰利用雷达前一时间刻发射的脉冲,提出采用发射脉冲间相互正交或准正交的随机相位扰动 LFM 信号,从而进行抗干扰。这些措施和认知雷达抗干扰思路类似,即通过对干扰效果的响应管理发射波形。作为一种改进思路,分集理论可以打破雷达方在抗干扰被动的局面。脉冲分集技术不仅可以增加干扰方截获与存储雷达信号的难度,而且可以通过对发射与接收信号集的分析与处理获得干扰信息,因而被应用于雷达有源欺骗干扰抑制。该思路最早由 Akhtar 提出,文献[43~45]从波形分集的角度抑制雷达有源欺骗干扰,通过发射正交脉冲编码信号实现欺骗干扰的对消;文献[46]采用正交频分复用(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号进行雷达抗欺骗干扰;针对新型密集假目标干扰,文献[47]提出了慢时域脉冲分集假目标干扰抑制算法;文献[48~49]针对慢时域算法在快变环境中的性能下降问题,提出了快-慢时域联合脉冲分集干扰抑制算法;文献[50]针对部分脉冲转发技术,提出一种时-频域联合脉冲分集方法,该算法即使在干扰机具备瞬时转发能力的情况下也能有效地对消假目标。现有脉冲分集抗干扰性能对比如表 1 所示。

表 1 脉冲分集抗干扰性能对比

Table 1 Performance comparison on pulse diversity

| 类别 | 文献[43~45] | 文献[46] | 文献[47] | 文献[48,49] | 文献[50] |
|--------|-----------|--------|--------|-----------|----------|
| 假目标类型 | 单距离假目标 | 多距离假目标 | 新体制干扰 | 单距离假目标 | 部分脉冲转发干扰 |
| 干扰检测概率 | 低 | 较高 | 低 | 高 | 高 |
| 输出信干比 | 较高 | 极高 | 较高 | 较高 | 极高 |
| 对抗瞬时干扰 | 不能 | 不能 | 不能 | 不能 | 能 |
| 计算量 | 低 | 低 | 低 | 高 | 中等 |

从脉冲分集抗有源欺骗干扰发展历程可以看出,该类抗干扰算法研究重心已从单一的时域信号集

设计转向慢时域、频域及其联合域分集波形设计,其结构简单且计算量相对较低。特别地,文献[51]创造地将数字水印技术应用于分集码的设计,进一步提高了抗干扰性能。然而分集信号将提高雷达复杂度,影响雷达基本功能,这个缺点将严重阻碍其工程实现。

2.2 天线空时自适应处理抗干扰

空时自适应处理技术(Space-time adaptive processing, STAP)技术最早用于机载雷达的杂波抑制。随着阵列技术的发展,一些新体制雷达通过设置多个雷达接收阵元,利用阵列处理方法估计有源干扰的特征参数,能够实现干扰信号的对消与抑制^[52,53]。文献[54,55]利用 STAP 技术,针对数字相控阵体制雷达,分别研究了跟踪雷达和搜索雷达的欺骗干扰抑制技术;文献[56]将 STAP 技术用于干扰条件下的角度估计,可以提高单脉冲雷达的抗干扰性能。MIMO 雷达技术的发展大大提高了系统的自由度,应运而生的 MIMO-STAP 技术具有很强的抗干扰能力^[57]。文献[58]基于局部 STAP 有效估计出干扰源的方位;文献[59]对 MIMO 雷达杂波加有源干扰协方差矩阵的结构进行了分析,证明了 MIMO 雷达在干扰和杂波抑制上的优越性;文献[60]利用知识辅助 MIMO-STAP,进一步提高自由度,在密集压制干扰下仍具有较好的性能。STAP 类抗干扰方法通过在特定方向设置零陷,从空域滤除干扰。其缺点较为明显:由于不具有距离维的自由度,当干扰和目标同向时(如自卫式干扰),将严重影响真实目标检测概率。上文提到的 MIMO-FDA 通过引入时域自由度,为解决该问题开辟了新思路。

3 信号与数据处理层面抗干扰

体制和系统层面抗干扰旨在避免有源干扰进入雷达接收机,当干扰进入雷达射频后端时,以上方法均难以奏效。信号与数据处理层面抗干扰利用干扰与目标回波表征的差异,辅以信息层面目标行为差异进行干扰抑制。该类措施可改善雷达抗干扰性能。

3.1 信号处理层面抗有源压制干扰

在信号层面,有源压制干扰与目标回波表征有很大的差异,在统计分布、时域、频域及变换域特征区分度较高,为抗干扰提供了理论依据。国内外学者对雷达抗有源压制式干扰的研究集中在以下 4 个方面:

(1) 强干扰背景下的目标检测。文献[61,62]最早研究了通过改变采样率从噪声中提取信号;文献[63]研究了基于随机共振的弱目标检测方法,将强噪声转化为对目标检测有利的部分。该类方法初衷是研究低信噪比下微弱目标检测,当干扰功率过强时将失效。

(2) 多域滤波与子空间分离。这类方法主要利用目标回波和干扰的多域表征差异进行抗干扰。文献[64~66]针对 LFM 信号,利用分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier transform, FrFT)和经验模态分解(Empirical mode decomposition, EMD)抑制压制类干扰;文献[67]通过匹配滤波和小波变换对干扰进行抑制;文献[68]研究了 FrFT 和多项式 FFT 等方法来抑制窄带干扰,但该方法只适用于单频或多频干扰的抑制;文献[69]针对噪声调幅干扰,通过建立完备原子库,采用加权匹配跟踪方法达到了自适应抑制干扰的目的;文献[70,71]利用多通道的接收信号,借助盲源分离技术抑制干扰,但该方法对单通道接收机的情况失效;文献[72,73]建立了映射原则,研究了目标回波和干扰的典范相关分析特征向量差异性,分离出回波从而抑制干扰。文献[74,75]设计斜投影算子,并通过极化滤波的方法抑制干扰,该方法能较高程度地保留目标回波信息。对于利用多域滤波与子空间分离的方法,分辨率成为影响性能的最重要因素之一。

(3) 自适应干扰重构对消。当干信比极高时,干扰将表现为接收信号的主要成分。在这一假设下,可以通过重构干扰分量进行自适应干扰对消。文献[76]针对 PD 雷达所受脉冲干扰,对雷达接收信号进行慢时域滤波,通过门限判决的方式区分目标回波和干扰,从而对消干扰。国内最早由作者所在团队

从这个角度开展相关算法研究,文献[77~79]研究了射频噪声干扰和频谱阻塞干扰的抑制方法。利用两种干扰信号的特征,针对性地提出了干扰重构的方式,并在时域和频域对消干扰。在此基础上研究了用相位匹配实现干扰环境下 LFM 信号的检测。文献[80]改进了最小均方误差算法,提高了对消性能。然而,该类方法要求干扰必须是恒模信号,当存在接收机带宽限制时性能将有所降低。

(4) 对于 LFM 雷达,解线调类抗干扰技术可显著提高雷达性能,作者所在团队对该类方法展开了大量的研究。文献[81]提出基于解线调-EMD 干扰抑制方法,该方法在低干信比条件下,可在跟踪状态下抑制有源欺骗干扰;文献[82]利用分段解线调的方式对压制类干扰进行抑制,在较低干信比情况下,具有较理想的干扰抑制效果;文献[83]针对成像雷达宽带噪声干扰,利用解线调和特征空间滤波进行干扰抑制。

还有部分文献从空域滤波、极化与旁瓣对消的角度对抗有源压制干扰,上文已经有所提及,此处不再赘述。随着雷达组网技术的发展,组网雷达抗有源压制干扰逐渐受到国内外学者的重视,文献[84]用序贯滤波跟踪算法加强了组网雷达的跟踪能力;文献[85]针对远距离支援干扰,根据干扰强度作自适应调整,提高了组网雷达跟踪目标的能力。从信号处理的角度抗有源压制干扰仍有较多不足:首先,大部分抗干扰算法需要假设干扰是恒模信号,这在实际对抗场景下是不现实的;其次,随着干扰带宽、发射功率的增加,干扰可以在多域遮盖目标回波,在不具备先验信息的情况下很难将干扰和目标回波分离开;最后,解线调类方法使干扰抑制模块输出分量携带发射信号特征,将影响微弱目标的检测。这些瓶颈限制了抗有源压制干扰算法的工程化实现,也势必是未来研究需要突破的难点。

3.2 信号及数据处理层面抗有源欺骗干扰

有源欺骗干扰对抗主要分为干扰感知和干扰抑制。作者提出了干扰感知的概念,囊括了有源干扰的检测与识别。有源欺骗干扰抑制研究的开展在大多数情况下都需要干扰感知提供的先验信息,二者相辅相成。

3.2.1 有源欺骗干扰薄弱环节

一方面,现代雷达通常兼具多种功能,雷达检报从最初仅具有距离和方位信息到现代雷达可以提供距离、方位、速度和目标识别等信息,雷达功能的丰富使得假目标行为失配、雷达反射面积(Radar cross section, RCS)调制失常与微多普勒特征失常等特征明显暴露。另一方面,现代有源欺骗干扰通常由 DRFM 辅助产生,通过 DRFM 干扰机的工作流程分析可知,干扰机对截获的雷达发射信号进行距离、多普勒调制,产生欺骗干扰。文献[86]对每个环节干扰机引入的失真给出了详细的分析。由于干扰机的频率变换环节、射频功率放大器等器件的非线性,引入的非线性失真对调制产生的信号进行二次调制,所产生的假目标带有干扰机的指纹特征,这种特征为信号层面有源欺骗干扰感知提供了依据。

3.2.2 有源欺骗干扰感知方法

由于干扰薄弱环节分析可将现有的干扰感知算法概括为以下 4 种思路。

(1) Hill 等最早于 1992 年在文献[87]分析了 DRFM 欺骗干扰的量化特性,采用高阶统计量提取欺骗干扰的特征参数,开创了从 DRFM 相位量化的角度来识别欺骗干扰的先河;文献[88,89]分析了 DRFM 离散延时特性对 RGPO 信号产生的谐波效应,建立了 RGPO 的时域、频域数学模型,分析了基于 DRFM 干扰机的谐波失真,为后续研究完善了理论基础;文献[90~92]讨论了相位量化和时延离散化对干扰信号频谱的影响,将干扰信号进一步建模为信号锥模型,研究了基于自适应相参估计和基于广义似然比检验的两种不同的感知方法,遗憾的是,该算法仅在模数转换器(Analog to digital convertor, ADC)量化位数小于 4 位的条件下有效,当 ADC 量化位数大于 4 位时,干扰谐波分量减弱,检测性能将急剧下降;文献[93~96]将此方法推广到了阵列信号中,利用改进的自适应检测器在确保系统的恒虚警特性的基础上在有源欺骗干扰背景下检测目标,然而当量化位数大于 4 位时,此方法仍然难以有效识别

欺骗干扰。文献[97~98]在相位量化模型基础上,分析了R-VGPO干扰在实际生成过程中相位量化和多普勒调制对频谱特性的影响,利用原子分解理论实现了雷达欺骗式干扰感知。不难看出,随着干扰机量化位数的增加,量化引入的谐波分量将急剧减小。作者所在团队提出了利用干扰机功率放大器非线性失真分析进行有源欺骗干扰感知的思路^[86],利用实测数据分析取得了一定的效果。

(2) 目标回波由于反射系数、照射角度等不同将具有一定的幅度调制特征,转发式假目标很难模拟这一特征。除了幅度起伏度的差异,有源欺骗干扰在多域、多维度下均可能与目标回波存在差异。基于这一假设,文献[99]基于频率分集技术研究了RGPO干扰鉴别算法,该算法基于目标起伏特性鉴别真实目标与假目标,具体表现为目标回波幅度服从Rayleigh分布,而由DRFM转发的距离拖引干扰在短时间内幅度保持不变,利用广义极大似然(General likelihood ratio test, GLRT)模型完成干扰信号检测;作者所在团队与合作单位在以上研究的启发下,在文献[100~103]中利用距离欺骗干扰信号和目标回波在能量与起伏特性方面的差异,提取了统计特征、高阶矩特征和双谱特征以及组合特征因子,通过神经网络识别器对转发式欺骗干扰进行识别,得到了较好的欺骗式干扰感知性能;文献[104~105]利用R-VGPO干扰与目标回波在信号强度、起伏特性以及多普勒频移的差异进行干扰感知;文献[106]分析了欺骗干扰和目标回波在接收信号波形上的几何图像特征差异,提取了展度、包络的起伏特特征和灰度长短轴投影特征,利用免疫神经网络分类器实现了雷达有源干扰的有效识别;文献[107]针对距离拖引、速度拖引和距离-速度同步拖引干扰,根据其拖引过程的幅度特性、时域和频域展宽特性进行识别。

需要指出的是,利用时域、频域特征进行干扰感知的方法在低干噪比下性能下降。为了解决这一问题,学者将研究重心转向变换域。文献[108]基于速度拖引干扰的信号模型,研究了一种基于小波分解的识别速度拖引干扰的方法;文献[109, 110]分析二维频谱的变化进行VGPO的检测,而且可以获得VGPO的拖引参数;文献[111]假设欺骗干扰信号能量强于目标回波,基于小波分析,研究了VGPO干扰和噪声调频干扰下雷达目标的识别;文献[112]在二维频谱上用小波分解技术提取不同尺度下的相像系数,分别利用最近邻分类器、神经网络和最小二乘支持向量机对RGPO, VGPO和噪声干扰进行了有效识别;文献[113, 114]在估计SMSP干扰和C&I干扰调频斜率的基础上,采用匹配傅里叶变换和模糊函数进行干扰识别。此外,当单一域性能下降时,可采用多域联合提高干扰感知性能。利用这个思想,作者所在团队在文献[115]提取了时域、频域、小波域和双谱域的数十种特征参数,实现了多种干扰的综合感知;文献[116]从真实目标回波和复合欺骗干扰的数学模型出发,提取了分形维数、复杂度及相象系数等特征,对加性、乘性和卷积性复合干扰进行了有效的识别。国内外学者利用有源欺骗干扰的统计特征与多域/多维度联合特性展开了大量的研究。然而,该类方法受对抗场景模型影响较大,对干扰样式的要求过于苛刻,低信噪比(干噪比)下鲁棒性较差,容易在复杂电磁环境下失效。

(3) 利用假目标行为特征从雷达数据处理层面进行干扰感知。文献[117]采用固定增益卡尔曼滤波算法实现了RGPO环境下的目标跟踪算法;文献[118, 119]针对电子干扰下相控阵雷达跟踪机动目标的基准问题(即在虚警背景下抗远距离支援干扰及RGPO干扰)研究了最佳跟踪算法,随后基于交互多模型概率数据互联滤波(Interacting multiple model probabilistic data association filter, IMMPPDAF)滤波器解决在欺骗干扰环境下的目标跟踪问题;文献[120]在二元假设检验框架下,从理论上提出分解与融合(Decomposition and fusion, DF)方法,在距离欺骗式干扰及杂波干扰下正确跟踪目标;文献[121]利用多频谱测量结果分析时延-多普勒失配,利用偏差的马氏距离与阈值比较判别是否受到了距离拖引或速度拖引干扰;文献[122]根据多普勒频率的变化规律,认为VGPO干扰多普勒变化率有规律,而真实目标的多普勒变化率无规律,利用多普勒频率比较法进行VGPO干扰的鉴别。

(4) 改进雷达网数据融合算法进行虚假航迹感知。干扰机协同干扰产生的虚假航迹成为组网雷达最大的威胁之一。文献[123~127]针对于电子战飞行器(Electronic combat air vehicle, ECAV)协同控制引入的误差,研究了虚假航迹干扰鉴别方法,取得了一定的效果。不论是信号处理层面还是数据处理

层面,有源干扰感知的核心在于研究干扰与目标回波可分离性。这种可分离性的分析也为后续有源欺骗干扰抑制提供依据。

3.2.3 有源欺骗干扰抑制

国内外学者在有源欺骗干扰感知算法研究的基础上对有源欺骗干扰抑制展开了大量的研究,其思路可分为以下3类。

(1) 基于多域分离的雷达抗干扰,该类方法分析目标回波信号和干扰的时域、频域、联合域及其变换域的可分离性,利用该性质进行干扰抑制。文献[128~130]基于拖引干扰和转发式假目标的频谱特征和匹配跟踪算法抑制有源欺骗干扰,但该方法在欺骗干扰与目标回波高度相关时失效;文献[131]基于随机调频斜率研究了雷达有源欺骗干扰类型识别,利用瞬时互相关进行干扰抑制;文献[132~134]分别基于目标回波信号霍夫分离度、匹配傅里叶分离度和谱分离度等参数,分析了雷达有源欺骗干扰抑制,上述方法仅在单目标下有较好的效果;文献[135~137]基于解线调技术研究了 DRFM 干扰机转发式虚假目标干扰抑制,在特定干扰环境下有效;文献[138,139]分别基于狭义与广义盲分离技术,进行雷达有源欺骗干扰的抑制,但上述方法对运算资源需求甚大,并且要求干扰机 ADC 采用较低的量化位数;文献[140,141]基于校正谱分析和解线调技术,研究导引头抗干扰和速度波门抗干扰;文献[142]基于 FrFT,FFT 及原子分解,研究了 SMSF 这类新体制干扰的抑制;文献[143,144]假设转发式假目标具有随机相位,从而利用慢时域匹配滤波抑制欺骗干扰。

(2) 基于随机理论和统计特征的雷达抗干扰。基于目标回波和雷达有源欺骗干扰统计特征差异实现干扰抑制。文献[94,95]基于干扰和目标回波统计特性差异,创新性地提出了一系列 ECM 信号背景下自适应检测器;文献[96]将其扩展到雷达组网的情况下,这类自适应检测器通过干扰背景下的自适应目标检测,剔除掉可能存在的假目标,为后续干扰抑制提供了一个可行的思路。然而,该类自适应检测器在低信噪和低于干噪比下性能急剧恶化(通常需要信噪比/干噪比大于 15 dB)。此外,对于干扰量化位数的要求限制其应用于实际对抗场景。

(3) 利用信息融合技术在数据处理层面进行假目标/虚假航迹剔除。文献[145]提出了基于模糊数据融合理论雷达网数据关联算法,采用隶属函数和模糊矩阵实现跟踪过程中点迹和航迹的关联配对,在一定程度上抑制了雷达有源欺骗干扰;文献[146]针对 MIMO 雷达,根据正交二相编码调制的雷达发射信号,实时地对目标回波图像进行恒虚警检测及数据融合,较好地剔除了假目标。文献[147]通过雷达多目标跟踪、航迹关联检验和串行滤波融合等步骤研究了网络化雷达多假目标剔除;文献[148,149]提出了分布式干扰条件下基于雷达量测模型的目标跟踪技术,提高了雷达跟踪航迹的连续性和稳定性;文献[150]针对自卫式转发虚假航迹,利用角度信息与判决融合有效剔除了航迹假目标。

虽然国内外学者已经展开了大量的研究,但是雷达信号处理及数据处理层面抗有源欺骗干扰方法研究仍任重道远,其工程化限制依然明显。首先,现有算法对模型的要求过于苛刻,稳健性不强;其次,现有算法资源消耗巨大,难以实时实现;最后,相比于系统及体制层面抗干扰,信号处理层面引入的波形失真和数据处理层面引入的量测误差均约束算法实际应用。

4 抗干扰效能评估

Johnston 最早在文献[151]提出了单部雷达系统的抗干扰改善因子,即采取抗干扰措施前后的信干比的比值来进行抗干扰效能评估。衡量抗干扰效能另一个重要的指标是回波保真度,即采取抗干扰措施前后目标回波信号失真和信息的损失。对于具有目标跟踪能力的雷达,文献[119]指出当角度误差大于双向波束宽度或距离、多普勒误差大于 1.5 倍波门宽度时,目标跟踪将失效,该准则亦可以应用于抗干扰效能评估中。国内外学者对抗干扰效能评估开展了少量研究,研究重心主要集中在以下两点。

(1) 效能评估参数的选取。文献[152,153]基于遵循完备性、合理性和独立性的原则,从侦察能力、

信号处理能力方面分析雷达的抗干扰效果,但该方法忽略了时效性;文献[154~160]分别利用抗干扰品质因数、雷达探测性能改善和干扰压制系数等指标评估雷达的抗干扰效能。现有方法主要从战术应用准则、功率准则、信息准则、概率准则和时间准则等角度去评估雷达系统的抗干扰性能。然而这些参数只能从某个方面反映雷达的抗干扰性能,不具备完备性。一套良好的评估参数应满足完备性、简练性、独立性和冗余度低等原则。

(2) 评估模型的建立,即确定各个评估指标的贡献度。文献[152,161~165]分别采用模糊数学理论、神经网络分析法、证据理论和模糊综合评估法建立评估模型。作为最近研究的热点,作者认为数据挖掘技术的发展也将成为雷达系统抗干扰效能评估的重点方法。需要指出的是,现有的评估模型具有较强的主观性,在实际场景下是否恰当仍有待商榷。现有的雷达抗干扰效能评估体系仍不完善。特别地,对雷达网抗干扰效能评估还需要进一步研究。

5 结 论

本文对雷达抗有源干扰理论框架进行了层次化的描述,详细阐述了抗有源干扰所涉及的关键技术,综述了国内外研究成果、存在的公开问题及最新的相关理论。在现有研究成果的支撑下,仍有很多研究方向需要进一步完善。(1) 抗复合式干扰:多种干扰方式并存,已逐渐成为现代雷达干扰的主要手段。由于复合式干扰方式比较复杂,手段和方法不断更新,较多用于雷达 ECM,但相应的 ECCM 研究较少。(2) 多层面信息融合下的组网雷达抗干扰。现有的方法多集中于改进雷达网点迹层面信息融合算法,使其具有抗干扰性能。该抗干扰思路虽然具有一定的效果,但常常需要进行大量的点迹、航迹关联,面临计算复杂度爆炸。仅在点迹层面进行信息融合并没有利用雷达组网的优势,作者所在团队通过改进专家理论,从判决融合、信号融合及多层面联合信息融合进行了尝试,取得了一定的效果。(3) 抗高密度转发型假目标干扰。对该类干扰的对抗手段鲜有公开报道。虽然已经有少量文献对低密度密集假目标干扰进行讨论,但这些算法仍要求干扰与目标回波在某个特定域具有一定的可分性。而对于多域重叠的高密度密集假目标干扰对抗问题有待解决。综上所述,作为电子对抗领域中最坚固的盾,雷达抗有源干扰理论完善与工程实现均具有广阔的前景。未来雷达工程师的研究思路需要从根据雷达体制设计抗干扰算法转向由抗干扰技术和需求指导雷达设计。

参考文献:

- [1] 王雪松,刘建成,张文明,等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学:信息科学,2006,36(8):891-901.
Wang Xuesong, Liu Jiancheng, Zhang Wenming, et al. Mathematic principle of intermittent sampling repeater jamming [J]. Science China : Information Science, 2006,36(8):891-901.
- [2] Sparrow M J, Cikaló J. ECM techniques to counter pulse compression radar[P]. USA, 7081846 B1, 2006.
- [3] Sergei A V, Shustov L, Robert H D. Fundamentals of electronic warfare[M]. Boston: Artech House, 2001:102-105.
- [4] Schleher D C. Electronic warfare in the information age [M]. Massachusetts: Artech House, 1999:128-196.
- [5] Blanding W R, Koch W, Nickel U. Adaptive phased-array tracking in ECM using negative information [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(1):152 - 166.
- [6] 李伟,梁甸农,董臻. 一种捷变调频斜率极性和限幅相结合的 SAR 抗干扰方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(2):171-176.
Li Wei, Liang Diannong, Dong Zhen. SAR anti-jamming method based on jittering slope polarity of LFM and thresholding [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2):171-176.
- [7] Rosenberg L, Gray D. Anti-jamming techniques for multichannel SAR imaging [J]. IEE Proceedings- Radar Sonar and Navigation, 2006, 153(3):234-242.
- [8] Xu J, Liao G, Zhu S, et al. Deceptive jamming suppression with frequency diverse MIMO radar [J]. Signal Processing, 2015, 113:9-17.
- [9] Haykin S. Cognitive radar: A way of the future [J], IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1):30-40.
- [10] 沈妮,肖龙,谢伟,等. 认知技术在电子战装备中的发展分析[J]. 电子信息对抗技术,2011,26(6):22-26.
Shen Ni, Xiao Long, Xie Wei, et al. Developing analysis of cognitive technology on EW equipment [J]. Electronic Warfare

- Technology, 2011, 26(6):22-26.
- [11] Nathanson F E. Adaptive circular polarization[C]// International Radar Conference. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1975:221-225.
- [12] Stapor D P. Optimal receive antenna polarization in the presence of interference and noise [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1995, 43(5):473-477.
- [13] 王雪松, 庄钊文. 极化信号的优化接收理论: 完全极化情形[J]. *电子学报*, 1998, 26(6):42-46.
Wang Xuesong, Zhuang Zhaowen. Optimization of reception theory on polarization signal: Fully polarized situation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1998, 26(6):42-46.
- [14] 王雪松, 徐淮海, 代大海, 等. 干扰环境中部分极化信号的最佳滤波[J]. *电子与信息学报*, 2004, 26(4):593-597.
Wang Xuesong, Xu Zhenhai, Dai Dahai, et al. Optimal filtering of partially polarized signals in the interference background [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4):593-597.
- [15] 王雪松, 代大海, 徐淮海, 等. 极化滤波器的性能评估与选择[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(4):442-448.
Wang Xuesong, Dai Dahai, Xu Zhenhai, et al. Performance evaluation and selection of polarized filter [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(4):442-448.
- [16] 杨运甫, 陶然, 王越. 基于极化椭圆参数的零导数正交搜索最优极化方法[J]. *电子学报*, 2005, 33(10):1812-1816.
Yang Yunfu, Tao Ran, Wang Yue. Zero differential orthogonal searching for optimal polarization based on the polarization ellipse parameters [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(10):1812-1816.
- [17] Yang Y, Tao R, Wang Y. A new SINR equation based on the polarization ellipse parameters [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, 53(4):1571-1577.
- [18] Wang X, Chang Y, Dai D, et al. Band characteristics of SINR polarization filter [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(4):1148-1154.
- [19] 施龙飞, 王雪松, 肖顺平, 等. 干扰背景下雷达最佳极化的分步估计方法[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(11):1324-1329.
Shi Longfei, Wang Xuesong, Xiao Shunping, et al. Radar's optimal polarised distribution estimation method on interference background [J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(11):1324-1329.
- [20] 张国毅, 刘永坦. 高频地波雷达多干扰的极化抑制[J]. *电子学报*, 2001, 29(9):1206-1209.
Zhang Guoyi, Liu Yongtan. Polarization suppression of multidisturbance in HF ground wave Radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(9):1206-1209.
- [21] 张国毅. 高频地波雷达极化抗干扰技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
Zhang Guoyi. Study on the polarization jamming technology in HF ground wave radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002.
- [22] 罗佳. 天线空域极化特性及应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
Luo Jia. Application and analysis of spatial polarization characteristics for antenna [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.
- [23] 李金梁, 罗佳, 常宇亮, 等. 基于天线空域极化特性的虚拟极化接收技术[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(3):389-393.
Li Jinliang, Luo Jia, Chang Yuluang, Virtual polarization receiver based on the spatial polarization characteristics of antenna [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(3):389-393.
- [24] 施龙飞. 雷达极化抗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
Shi Longfei. Study on the suppression of interference with radar polarization information [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [25] 常宇亮. 瞬态极化雷达测量、检测与抗干技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Chang Yuliang. Study on measurement, detection and inference suppression technologies of instantaneous polarimetry radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [26] 刘勇. 动态目标极化特性测量与极化雷达抗干扰新方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Liu Yong. Study on moving target polarization characteristic measurement and polarization radar anti-jamming techniques [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [27] 周万幸. 一种新型极化抗干扰技术研究[J]. *电子学报*, 2009, 37(3):454-458.
Zhou Wanxing. Research of a new type techniques for anti-interference using polarization [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(3):454-458.
- [28] 罗双才, 唐斌. 一种空域-极化域联合的雷达欺骗干扰抑制算法[J]. *信号处理*, 2012, 28(3):443-448.
Luo Shuangcai, Tang Bin. An algorithm of radar deception jamming suppression based on the joint processing in spatial and polarization domains [J]. *Signal Processing*, 2012, 28(3):443-448.
- [29] 李永祯, 王雪松, 王涛, 等. 有源诱饵的极化鉴别研究[J]. *国防科技大学学报*, 2004, 26(3):83-88.
Li Yongzhen, Wang Xuesong, Wang Tao, et al. Polarization discrimination algorithm of active decoy and radar target [J].

Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(3):83-88.

- [30] 李永祯, 王雪松, 肖顺平, 等. 基于 IPPV 的真假目标极化鉴别算法[J]. 现代雷达, 2004, 26(9):38-42.
Li Yongzhen, Wang Xuesong, Xiao Shunping, et al. A new polarization discrimination algorithm for active decoy and radar target based on IPPV [J]. Modern Radar, 2004, 26(9):38-42.
- [31] 王涛, 王雪松, 肖顺平. 随机调制单极化有源假目标的极化鉴别研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5):611-617.
Wang Tao, Wang Xuesong, Xiao Shunping. Study on polarization discrimination of random modulation single polarized active decoy[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(5):611-617.
- [32] 施龙飞, 王雪松, 肖顺平. 转发式假目标干扰的极化鉴别[J]. 中国科学, 2009(4):468-475.
Shi Longfei, Wang Xuesong, Xiao Shunping. Polarization discrimination of repeater false target jamming [J]. Science China, 2009(4):468-475.
- [33] Stavroulakis P, Farsaris N, Xenos T D. Anti-jamming transmitter independent radar networks [C]//International Conference on Signal Processing. Chennai; IEEE, 2008:269-273.
- [34] Blanding W R, Koch W, Nickel U. Adaptive phased-array tracking in ecm using negative information[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(1):152 - 166.
- [35] Garmatyuk D S, Narayanan R M. ECCM capabilities of an ultra-wideband bandlimited random noise imaging radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4):1243-1255.
- [36] Rosenberg L, Gray D. Anti-jamming techniques for multichannel SAR imaging [J]. IEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation, 2006, 153(3):234-242.
- [37] 周武, 董文锋, 许端. 雷达网抗干扰能力评估研究[J]. 空军预警学院学报, 2012(6):434-437.
Zhou Wu, Dong Wenfeng, Xu Duan. Research on evaluation of netted radar anti-jamming capability[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2012(6):434-437.
- [38] Maithripala D H A, Jayasuriya S, Mears M J, et al. Phantom track generation through cooperative control of multiple eavs based on feasibility analysis[J]. Transactions of the ASME, 2007, Vol. 129:708-715.
- [39] Maithripala D H A, Jayasuriya S. Feasibility considerations in formation control: Phantom track generation through multi-UAV collaboration[C]// IEEE Conference on Decision and Control. Cancun; IEEE, 2009:3959-3964.
- [40] Lee I H, Bang H. Optimal phantom track generation for multiple electronic combat air vehicles [C]// International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul; IEEE, 2008:29-33.
- [41] Davis R M, Fante R L, Guella T P, et al. Interference suppression via operating frequency selection [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1999, 47(4):637-645.
- [42] Soumekh M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 2006, 42(1):191-205.
- [43] Akhtar J. An ECCM scheme for orthogonal independent range-focusing of real and false targets [C]// IEEE Radar Conference. Boston, MA; IEEE, 2007:846-849.
- [44] Akhtar J. Orthogonal block coded ECCM schemes against repeat radar jammers [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3):1218-1226.
- [45] Akhtar J. Removal of range ambiguities with orthogonal block coding techniques [J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2010, 29(29):311-330.
- [46] Schuergler J, Garmatyuk D. Performance of random OFDM radar signals in deception jamming scenarios [C]// IEEE Radar Conference. Pasadena, CA; IEEE, 2009:1-6.
- [47] Gang Lu, Bin Tang, Guan Gui. Deception ECM signals cancellation processor with joint time-frequency pulse diversity [J]. IEICE Electronics Express, 2011, 8(19): 1608 -1613.
- [48] Gang Lu, Bin Tang. Deception jammer rejection using pulse diversity in joint slow/fast-time domain [J]. Journal- Chinese Institute of Engineers, 2013, 36(3):405-410.
- [49] Yu C, Ma X, Zhang Y, et al. Multichannel SAR ECCM based on fast-time STAP and pulse diversity [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver, BC; IEEE, 2011:921-924.
- [50] Lu G, Liao S, Luo S C, et al. Cancellation of complicated drfm range false targets via temporal pulse diversity [J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2010, 16:69-84.
- [51] 卢刚, 唐斌, 罗双才. LFM 雷达中 DRFM 假目标自适应抵消方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8):1760-1764.
Lu Gang, Tang Bin, Luo Shuangcai. Adaptive cancellation of DRFM false targets for LFM radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(8):1760-1764.
- [52] 张荣文, 李彦鹏, 教亚飞. 基于脉冲分集理论的雷达波形数字水印抗 DRFM 干扰技术[J]. 信号处理, 2015, 31(12): 1649-1653.
Zhang Rongwen, Li Yanpeng, Jiao Yafei. Approach of radar waveform digital watermark against DRFM jamming based on

- waveform pulse diversity theory [J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(12):1649-1653.
- [53] 张光义. 相控阵雷达系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 454-456.
Zhang Guangyi. Phased array radar system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994: 454-456.
- [54] Scanlan M J B. Modern radar techniques [M]. New York: Macmillan Publishing Co, 1987:63-69.
- [55] 唐孝国, 张剑云, 王珽. 对空时自适应处理技术的欺骗干扰研究[J]. *航天电子对抗*, 2012(5):61-64.
Tang Xiaoguo, Zhang Jianyun, Wang Ting. Study on deceptive jamming for space time adaptive processing [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012(5):61-64.
- [56] 文才, 王彤, 吴亿锋, 等. 极化-空域联合抗机载雷达欺骗式主瓣干扰[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(7):1552-1559.
Wen Cai, Wang Tong, Wu Yifeng, et al. Deceptive mainlobe jamming suppression for air borne radar based on joint processing in polarizational and spatial domains [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(7): 1552-1559.
- [57] Bliss D W, Forsythe K W. Multiple-input multiple-output (MIMO) radar and imaging: Degrees of freedom and resolution [C]// *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on*. USA: IEEE, 2003:54-59.
- [58] 马汇淼, 马林华, 甘元, 等. STAP 技术在有源干扰环境下的运用方法[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*, 2012, 13(3): 65-69.
Ma Huimiao, Ma Linhua, Gan Yuan, et al. Application method of STAP technology in the presence of jammers [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2012, 13(3):65-69.
- [59] 杨晓超, 刘宏伟, 王勇, 等. 有源干扰条件下机载 MIMO 雷达 STAP 协方差矩阵秩的分析[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(7):1616-1622.
Yang Xiaochao, Liu Hongwei, Wang Yong, et al. STAP covariance matrix rank analysis for airborne MIMO radar in the presence of jammers [J]. *Journal of Electronics and Information technology*, 2012, 34(7):1616-1622.
- [60] 郝琳, 张永顺, 李哲, 等. 一种基于知识辅助的 MIMO-STAP 抗干扰算法[J]. *现代防御技术*, 2015, 43(6):158-162,168.
Hao Lin, Zhang Yongshun, Li Zhe, et al. Knowledge-aided MIMO • STAP anti-jamming algorithm [J]. *Modern Defence Technology*, 2015, 43(6):158-162,168.
- [61] Bey N Y. Extraction of buried signals in noise: Correlated processes [J]. *International Journal of Communications Network & System Sciences*, 2010, 3(11):855-862.
- [62] Bey N Y. Extraction of signals buried in noise: Non-Ergodic processes [J]. *International Journal of Communications Network & System Sciences*, 2010, 3(12):907-915.
- [63] 胡萋庆, 温熙森, 陈敏. 随机共振原理在强噪声背景信号检测中的应用[J]. *国防科技大学学报*, 2001, 23(4):40-44.
Hu Niaoqing, Wen Xisen, Chen Min. The application of stochastic resonance theory for detecting weak signals in heavy background noise [J]. *Journal of National University of defense Technology*, 200123(4):40-44.
- [64] Elgamel S A, Soraghan J J. Using EMD-FrFT filtering to mitigate very high power interference in chirp tracking radars [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2011, 18(4): 263-266.
- [65] Elgamel S A, Soraghan J. Mitigate high power interference noise in chirp radar systems using EMD-FrFT filtering [C]//17th International Conference on Digital Signal Processing. Corfu: IEEE, 2011, 1-6.
- [66] Elgamel S A, Soraghan J. Empirical mode decomposition-based monopulse processor for enhanced radar tracking in the presence of high-power interference [J]. *Radar, Sonar and Navigation, IET*, 2011, 5(7): 769-779.
- [67] Islam M S, Chong U. Noise reduction of continuous wave radar and pulse radar using matched filter and wavelets [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, 2014(1): 1-9.
- [68] Dakovi M, Thayaparan T, Djukanovi S, et al. Time-frequency-based non-stationary interference suppression for noise radar systems [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2008, 2(4): 306-314.
- [69] 杨秀凯. 雷达有源压制干扰对抗算法研究与试验数据分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
Yang Xiukai. Study of the suppression method for radar active blanket jamming and field data analysis [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [70] 段克清, 王永良, 谢文冲. 机载相控阵雷达抗压制性噪声干扰方法研究[J]. *现代雷达*, 2009(11): 81-85.
Duan Keqing, Wang Yongliang, Xie Wenchong. Barrage noise jamming suppression methods for airborne phased array radar [J]. *Modern Radar*, 2009(11): 81-85.
- [71] 王建国, 伍光新, 周伟光. 盲源分离在雷达抗主瓣干扰中的应用研究[J]. *现代雷达*, 2010, (10): 46-49.
Wang Jianming, Wu Guangxin, Zhou Weiguang. A study on radar mainlobe jamming suppression based on blind source separation algorithm [J]. *Modern Radar*, 2010, (10): 46-49.
- [72] 袁湘辉, 黄高明, 杨绿溪. 基于典范相关分析的雷达抗干扰技术研究[J]. *现代雷达*, 2005, (07): 31-34.
Yuan Xianghui, Huang Gaoming, Yang Luxi. An anti-jamming technology for radar based on canonical correlation analysis

- [J]. *Modern Radar*, 2005, (07): 31-34.
- [73] Zhimao B, Gaoming H, Luxi Y. A radar anti-jamming technology based on canonical correlation analysis [C]// International Conference on Neural Networks and Brain. Beijing: IEEE, 2005, 9-12.
- [74] 张钦宇, 曹斌, 王健, 等. 基于斜投影的极化滤波技术[J]. *中国科学:信息科学*, 2010, 40(1):91-101.
Zhang Qinyu, Cao Bin, Wang Jian, et al. Polarization filtering technique based on oblique projection [J]. *Science China Press*, 2010, 40(1):91-101.
- [75] 毛兴鹏, 刘爱军, 邓维波, 等. 斜投影极化滤波器[J]. *电子学报*, 2010, 38(9):2003-2008.
Mao Xingpeng, Liu Aijun, Deng Weibo, et al. An oblique projecting polarization filter [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(9):2003-2008.
- [76] Hartley J D. A method for suppression of pulsed interference in a pulse Doppler radar [C]//International Conference on Radar. Adelaide, SA: IEEE, 2008: 265-270.
- [77] Dongping D, Bin T. Noise FM jamming suppression via logarithm transform [C]//International Conference on Communications, Circuits and Systems. Fujian: IEEE, 2008, 957-959.
- [78] 杜东平, 唐斌. 基于频域对消的噪声调幅干扰抑制算法[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(03): 557-559.
Du Dongping, Tang Bin. A high performance algorithm of noise amplitude modulation interference suppression based on frequency domain cancellation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 557-559.
- [79] 杜东平, 唐斌. 基于相位匹配的噪声调幅干扰下 LFM 信号检测[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(05): 1072-1074.
Du Dongping, Tang Bin. A detection method for lfm signal embedded in nma interference using signal phase matching principle [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1072-1074.
- [80] 龙戈农, 童宁宁, 李洪兵, 等. 改进的 LMS 算法及其在雷达干扰对消系统中的应用[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2010, 11(5): 31-34.
Long Genong, Tong ningning, li Hongbing, et al. A refrained lms algorithm and its application in radar jamming cancellation system [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2010, 11(5): 31-34.
- [81] 廖胜男. 雷达有源干扰抑制算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2010.
Liao Shengnan. Radar active interference suppression algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2010.
- [82] 李学澍. 雷达有源压制干扰识别抑制与速度欺骗干扰抑制方法研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2014.
Li Xueshu. Radar active suppressing jamming recognition inhibition and speed deception jamming suppression method research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [83] Ruan H, Ye W, Yin C, et al. Wide band noise interference suppression for SAR with dechirping and eigensubspace filtering [C]//International Conference on Intelligent Control and Information Processing. Dalian: IEEE, 2010: 39-42.
- [84] 王国宏, 李世忠, 白晶, 等. 压制干扰下组网雷达目标检测与跟踪技术[J]. *宇航学报*, 2012, 33(12):1781-1787.
Wang Guohong, Li shizhong, Bai Jing, et al. Target detection and tracking technique for radar network in the presence of suppressive jamming [J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(12):1781-1787.
- [85] 徐海全, 王国宏, 关成斌. 远距离支援干扰下的目标跟踪技术[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(11):1353-1358.
Xu Haiquan, Wang Guohong, Guan Chengbin. Tracking technique in the presence of standoff jamming [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11):1353-1358.
- [86] 田晓. 雷达有源欺骗干扰综合感知方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
Tain Xiao. Study on the methods of radar active deception jamming integrated sensing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [87] Hill C J, Truffert V. Statistical processing techniques for detecting DRFM repeat-jam radar signals [C]// IEE Colloquium on Signal Processing Techniques for Electronic Warfare. London: IEEE, 1992:1-6.
- [88] Berger S D. Digital radio frequency memory linear range gate stealer spectrum [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(2):725-735.
- [89] Berger S D. The spectrum of a digital radio frequency memory linear range gate stealer electronic attack signal [C]// Proceedings of the Radar Conference. Atlanta, GA: IEEE, 2001:27-30.
- [90] Greco M, Gini F, Farina A. Combined effect of phase and RGPO delay quantization on jamming signal spectrum [C]//IEEE International Radar Conference. Arlington, VA: IEEE, 2005:37-42.
- [91] Greco M, Gini F, Farina A, et al. Effect of phase and range gate pull-off delay quantisation on jammer signal [J]. *IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation*, 2006, 153(5):454-459.
- [92] Greco M, Gini F, Farina A. Radar detection and classification of jamming signals belonging to a cone class [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(5):1984-1993.
- [93] Bandiera F, Farina A, Orlando D, et al. Detection algorithms to discriminate between radar targets and ecm signals [J].

IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(12):5984-5993.

- [94] Pulsone, N. B. Rader C. M. Adaptive beamformer orthogonal rejection test [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001; 49(3), 521-529.
- [95] Coluccia, A, Ricci G. A tunable W-ABORT-like detector with improved detection vs rejection capabilities trade-off [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015; 22(6), 713-717.
- [96] Coluccia, A, Ricci G. ABORT-like detection strategies to combat possible deceptive ECM signals in a network of radars [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015; 63(11), 2904-2914.
- [97] 孙闽红, 唐斌. 距离-速度同步拖引欺骗干扰的频谱特征分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(1):83-85.
Sun Minhong, Tang Bin. Analysis of the frequency spectrum of a simultaneous range-gate-pull-off and velocity-gate-pull-off jamming signal [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(1):83-85.
- [98] 孙闽红, 唐斌. 基于原子分解理论的雷达欺骗式干扰信号特征提取[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3):550-554.
Sun Minhong, Tang Bin. Feature extraction of radar deceptive-jamming signal based on atomic decomposition [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(3):550-554.
- [99] Blair W D, Brandt-Pearce M. Discrimination of targets and RGPO echoes using frequency diversity [C]//Proceeding of the 29th Southeastern Symposium on System Theory. Cookeville, TN:IEEE, 1997:509-513.
- [100] 吕强, 李建勋, 秦江敏, 等. 基于神经网络的雷达抗转发式距离欺骗干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(2):240-243.
Lv Qiang, Li Jianxun, Qin Jiangmin, et al. Method against radar's transmitting deceptive jamming in distance based on neural network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(2):240-243.
- [101] 李建勋, 秦江敏, 马晓岩. 雷达抗应答式欺骗干扰中的特征提取研究[J]. 空军预警学院学报, 2004, 18(2):4-7.
Li Jianxun, Qin Jiangmin, Ma Xiaoyan. Study of feature extraction in radar anti-answering deception jamming [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2004, 18(2):4-7.
- [102] 李建勋, 秦江敏, 马晓岩. 基于神经网络的雷达抗应答式欺骗干扰方法[J]. 空军预警学院学报, 2003, 17(4):19-21.
Li Jianxun, Qin Jiangmin, Ma Xiaoyan. A method of radar anti-deception-jamming based on neural network [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2003, 17(4):19-21.
- [103] 李建勋, 唐斌, 吕强. 双谱特征提取在欺骗式干扰方式识别中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(3):329-332.
Li Jianxun, Tang Bin, Lv Qiang. Bispectrum feature extraction used in deceptive jamming modes recognition [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(3):329-332.
- [104] 户锋刚, 阮怀林, 曾昭勇. 对距离-速度欺骗干扰的识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(3):36-39.
Hu Fenggang, Ruan Huailin, Zen Zhaoyong. The method of recognition of range-velocity deception jamming [J]. Electronic Warfare Technology, 2007, 22(3):36-39.
- [105] 张红昌, 阮怀林. 基于支持向量机的雷达欺骗性干扰类型识别[J]. 火控雷达技术, 2009, 38(3):17-21.
Zhang Hongchang, Ruan Huailin. A radar deception jamming identification based on support vector machine [J]. Fire Control Radar Technology, 2009, 38(3):17-21.
- [106] 常成. 雷达欺骗式干扰检测与实现[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
Chang Cheng. Research and realization of radar active deceive jamming signal detection system [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [107] Tian X, Gui B T G. Product spectrum matrix feature extraction and recognition of radar deception jamming [J]. International Journal of Electronics, 2013, 100(12):1621-1629.
- [108] 陈浩, 何明浩, 毛五星. 小波分解在雷达抗速度欺骗干扰中的运用[J]. 空军预警学院学报, 2006, 20(1):31-33.
Chen Hao, He Minghao, Mao Wuxing. Application of wavelet decomposition to radar anti-velocity deception jamming [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2006, 20(1):31-33.
- [109] 陈建春, 耿富录. 基于线性预测滤波的抗速度欺骗干扰技术[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(2):22-24.
Chen Jianchun, Geng Fulu. Anti-velocity deception jamming technique based on linear prediction error filtering [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(2):22-24.
- [110] 陈建春. 速度拖引干扰的频谱识别技术[J]. 火控雷达技术, 1998(3):37-42.
Chen Jianchun. Frequency domain technique for recognition of velocity deception jamming [J]. Fire Control Radar Technology, 1998(3):37-42.
- [111] 张善文, 甄蜀春, 赵兴录, 等. 速度拖引干扰下运动目标检测[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(5):57-59.
Zhang Shanwen, Zhen Shuchun, Zhao Xinglu, et al. Detection of moving-target under velocity dragging jam [J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(5):57-59.
- [112] 熊伟, 曹兰英, 郝志梅. 基于多尺度相像系数的雷达干扰类型频域识别[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3):19-22.
Xiong Wei, Cao Yinglan, Hao Zhimei. Frequency recognition of radar jamming types base on multi-scale resemblance

- coefficient [J]. Computer Simulation, 2010, 27(3):19-22.
- [113] 李永平, 卢刚, 田晓, 等. 基于模糊函数的 SMSP 和 C&I 干扰识别算法[J]. 航空兵器, 2011(4):51-54.
Li Yongping, Lu Gang, Tian Xiao, et al. Jamming identification algorithms of smp and c&i based on ambiguity function [J]. Aero Weaponry, 2011(4):51-54.
- [114] Li Y, Xiong Y, Tang B. SMSP jamming identification based on matched signal transform[C]// International Conference on Computational Problem-Solving. Chengdu: IEEE, 2011:182-185.
- [115] 范伟. 雷达有源干扰信号特征分析与识别算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007.
Fan Wei. Radar active jamming signal feature analysis and recognition algorithm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [116] 刘旻. 雷达复合干扰信号特征提取及智能识别算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.
Liu Min. Radar compound jamming signal feature extraction and intelligent recognition algorithm research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [117] Blair W D, Brandt P M. Discrimination of target and RGPO echoes using frequency diversity[C]//System Theory, Proceedings of the Twenty-Ninth Southeastern Symposium on. Cookeville, TN: IEEE, 1997: 509-513.
- [118] Blair W D, Watson G A, Kirubarajan T, et al. Benchmark for radar allocation and tracking in ECM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4):1097-1114.
- [119] Kirubarajan T, Bar-Shalom Y, Blair W D, et al. IMMPDAF for radar management and tracking benchmark with ECM [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(4): 1115-1134.
- [120] Li X R, Slocumb B J, West P D. Tracking in the presence of range deception ECM and clutter by decomposition and fusion [J]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 1999, 3809:198-210.
- [121] Kural F, Ozkazanc Y. A method for detecting RGPO/VGPO jamming[C]// Signal Processing and Communications Applications Conference, Proceedings of the IEEE. Turkey: IEEE, 2004:237-240.
- [122] 张翼飞, 胡林华, 董云龙. 一种有效识别速度欺骗干扰的方法[J]. 空军预警学院学报, 2009, 23(3):181-183.
Zhang Yifei, Hu Linhua, Dong Yunlong. An effective method of recognizing velocity deception jamming [J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2009, 23(3):181-183.
- [123] 吴健平, 王国宏, 孙殿星, 等. 基于新息检验的分布式雷达网虚假航迹鉴别[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(1):67-72.
Wu Jianping, Wang Guohong, Sun Dianxing, et al. Phantom track discrimination based on inspection of innovation in distributed radar network[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(1):67-72.
- [124] 吴健平, 王国宏, 孙殿星, 等. 集中式雷达网鉴别虚假航迹的假设检验方法[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2):80-85.
Wu Jianping, Wang Guohong, Sun Dianxing, et al. A hypothesis testing method for phantom track discrimination in centralized radar network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2):80-85.
- [125] 杨忠, 王国宏, 孙殿星, 等. 基于马氏距离的雷达网有源假目标干扰鉴别技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(5): 437-441.
Yang Zhong, Wang Guohong, Sun Dianxing, et al. Based on the Markov distance active false target jamming is identification of radar net [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(5):437-441.
- [126] 孙殿星, 王国宏, 李迎春, 等. 距离多假目标干扰下低可观测目标跟踪处理[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 826-837.
Sun Dianxing, Wang Guohong, Li Yingchun, et al. Low observable target tracking processing in the presence of multi-range-false-target jamming [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(4): 826-837.
- [127] 孙殿星, 王国宏, 盛丹. 基于均值-方差联合检验的航迹欺骗干扰识别[J]. 航空学报, 2016, 37(4):1292-1304.
Sun Dianxing, Wang Guohong, Sheng Dan. The recognition of phantom track based on the joint inspection of mean and variance [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(4):1292-1304.
- [128] 孙闽红. 雷达抗有源欺骗式干扰算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2008.
Sun Minhong. Research on anti-jamming methods of radar active deception jamming[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [129] Sun Minhong, Tang Bin. Using polynomial phase signal modeling against range false targets[C]// 8th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Xi'an: IEEE, 2007, 712-716.
- [130] 孙闽红, 唐斌, 杜东平. 一种基于匹配跟踪的距离拖引欺骗干扰对抗技术[C]//第十五届电子对抗年会. 扬州:电子对抗, 2007:531-536.
Sun Minhong, Tang Bin, Du Dongping. Drag a matching tracking based on the distance deception jamming against technology[C]// The 15th Annual Electronic Countermeasures. Yangzhou: Electronic Countermeasures, 2007: 531-536.
- [131] 顾海燕. 距离-速度有源雷达干扰建模与对抗方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
Gu Haiyan. Modeling and anti-jam method of range-velocity active jamming of radar[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.

- [132] Gu Haiyan, Xiong Ying, Wang Pei, et al. Range-velocity synchronous gate-pull radar jamming suppression with instantaneous cross-correlation[C]// 2011 CIE International Conference on Radar. Chengdu; IEEE, 2011;1839-1842.
- [133] 顾海燕, 罗双才. 波门拖引干扰类型识别方法研究[J]. 电子信息对抗技术, 2010, 6:45-50.
Gu Haiyan, Luo Shuangcai. A recognition approach of gate-pull jamming [J]. *Electronic Warfare Technology*, 2010, 6: 45-50.
- [134] 顾海燕, 卢刚, 唐斌. 一种卷积干扰特征分析与识别方法[J]. 现代雷达, 2011, 33(3):39-43.
Gu Haiyan, Lu Gang, Tang Bin. A method of characteristic analysis and identification on convolution jamming[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(3):39-43.
- [135] 卢刚. 雷达有源假目标干扰抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
Lu Gang. Study of algorithms on suppression of radar active false targets [D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [136] 卢刚, 罗双才, 唐斌. LFM 雷达中 DRFM 假目标自适应对消方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8):1760-1764.
Lu Gang, Luo Shuangcai, Tang Bin. Adaptive cancellation of DRFM false targets for LFM radar [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8):1760-1764.
- [137] Gang Lu, Deguo Zeng, Bin Tang. Anti-jamming filtering for DRFM repeat jammer based on stretch processing[C]// Proceedings of the 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Dalian; IEEE, 2010, 178-182.
- [138] 罗双才, 唐斌. 一种基于盲分离的欺骗干扰抑制算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 12:2801-2806.
Luo Shuangcai, Tang Bin. An algorithm of deception jamming suppression based on blind signal separation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 12:2801-2806.
- [139] 罗双才. 基于盲分离的雷达有源欺骗干扰抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
Luo Shuangcai. Study of deception jamming suppression based on blind signal separation [D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [140] 张子敬, 张浩, 吴涓. 抗速度门拖引的解线性调频方法[J]. 西安电子科技大学学报, 1996, 23(02):211-217.
Zhang Zijing, Zhang Hao, Wu Huan. Speed door traction resistance solutions of linear frequency modulation method [J]. *Journal of Xidian University*, 1996, 23(02):211-217.
- [141] 刘义峰. 雷达抗有源欺骗干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
Liu Yifeng. Research on methods of radar anti-active deception jamming [D]. Xi'an; Xidian University, 2010.
- [142] Sun Minhong, Tang Bin. Suppression of smeared spectrum ECM signal [J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2011, 32(3): 407-413.
- [143] 张勇强, 于孝松. 基于 FFT 的有源欺骗干扰抑制[J]. 雷达科学与技术, 2013, 11(6):663-667, 670.
Zhang Yongqiang, Yu Xiaosong. Suppression of active deception jamming based on FFT [J]. *Radar Science and Technology*, 2013, 11(6):663-667, 670.
- [144] 张勇强, 伍岳, 于孝松. 基于初相匹配滤波的有源欺骗干扰抑制[J]. 电子信息对抗技术, 2013, 6:49-73.
Zhang Yongqiang, Wu Yue, Yu Xiaosong. An interference suppression of active deception jamming based on initial phase match filtering[J]. *Electronic Warfare Technology*, 2013, 6:49-73.
- [145] 田继华, 张平定, 王睿. 模糊数据融合在组网雷达数据关联中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 10:64-65.
Tian Jihua, Zhang Pingding, Wang Rui. An application of the fuzzy data fusion in the data association of radar networks [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 10:64-65.
- [146] 李伟, 张辉, 张群. 基于数据融合的 MIMO 雷达抗欺骗干扰算法[J]. 信号处理, 2011, 14:314-319.
Li Wei, Zhang Hui, Zhang Qun. An anti-deceptive jamming algorithm for mimo radar based on data fusion[J]. *Signal Processing*, 2011, 14:314-319.
- [147] 赵艳丽, 陈永光, 蒙洁, 等. 分布式组网雷达抗多假目标欺骗干扰处理方法[J]. 电光与控制, 2011, 18:25-29.
Zhao Yanli, Chen Yongguang, Meng Jie, et al. A data processing method against multi-false target deception jamming for distributed radar network[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18:25-29.
- [148] 蔡小勇, 蒋兴舟, 贾兴江, 等. 分布式电子干扰系统干扰效能分析与仿真[J]. 海军工程大学学报, 2006, 3:47-51.
Cai Xiaoyong, Jiang Xingzhou, Jia Xingjiang, et al. Analysis and simulation for efficiency of the distributing electronic jamming system [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 3:47-51.
- [149] 李世忠, 王国宏, 吴巍, 等. 分布式干扰下组网雷达目标检测与跟踪技术[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 4:782-788.
Li Shizhong, Wang Guohong, Wei Wei, et al. Detection and tracking technique for radar network in the presence of distributed jamming [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 4:782-788.
- [150] 李迎春, 王国宏, 孙殿星, 等. 雷达抗自卫转发式航迹假目标欺骗干扰技术[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 1242-1248.
Li Yingchun, Wang Guohong, Sun Dianxing, etc. Technique against self-protection repeating track false-target deceptive

- jamming for radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(6):1242-1248.
- [151] Johnston S L. Formulas for measuring radar ECCM capability [J]. Communications Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, 1984, 132(3):198-200.
- [152] Li W, Mao N, Pan W. The effectiveness evaluation model of radar jamming system based on wseiac model[C]// Control and Decision Conference. Yantai: IEEE, 2008:1848-1852.
- [153] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门:厦门大学, 2000.
Su Weihua. The multi-index comprehensive evaluation theory and method research [D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- [154] 朱国良. 制导雷达抗干扰度量标准的探讨[J]. 航天电子对抗, 1986(2):44-49.
Zhu Guoliang. The discussion of guidance radar anti-jamming measures [J]. Aerospace Electronic Warfare, 1986(2):44-49.
- [155] 陈永光, 邵国培, 张顺健. 复合干扰对多级雷达系统的对抗效能研究[J]. 现代雷达, 1999, 21(4):1-6.
Chen Yongguang, Shao Guopei, Zhang Shunjian. Study on ecm efficiency of multiple jamming against multi-stage radar system [J]. Modern Radar, 1999, 21(4):1-6.
- [156] Cao X, Fan H, Wu X. ECCM performance analysis of inter-pulses frequency agility application[C]// International Conference on Radar. Chengdu: IEEE, 2011: 222-225.
- [157] Foglia G, Marcantoni D, Trotta F, et al. ECM counteracting SLB: Analysis and effectiveness evaluation[C]// IEEE National Radar Conference. Rome: IEEE, 2008:1-6.
- [158] Jun-Jun S, Bi D P, Xue L. Novel evaluation method of jamming effect on ISAR based on target detection[C]// Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an: IEEE, 2009:892-895.
- [159] Mashade M B E. Performance analysis of cfar detection of fluctuating radar targets in nonideal operating environments [J]. American Journal of Signal Processing, 2012, 2(5):98-112.
- [160] 黄洪旭, 张巨泉, 徐晖. 雷达抗干扰能力评估的现状 & 设想[J]. 航天电子对抗, 2001(1):25-28.
Huang Hongxu, Zhang Juquan, Xu Hui. The present situation of the radar anti-jamming capability assessment and ideas [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2001(1):25-28.
- [161] 贺飞, 陶毓. 地面火控雷达抗干扰能力的综合衡量[J]. 航天电子对抗, 1987(1):1-8.
He Fei, Tao Yu. Ground fire control radar anti-jamming capability of comprehensive measure[J]. Aerospace Electronic Warfare, 1987(1): 1-8.
- [162] Hovanessian S A. Noise jammers as electronic countermeasures [J]. Microwave Journal, 1985, 28: 113-114, 116.
- [163] 龙方, 张晓林, 刘湘斌. 基于 ECM 效果矩阵的雷达 ECCM 性能评估准则[J]. 现代雷达, 2006, 28(1):20-22.
Long Fang, Zhang Xiaolin, Liu Xiangbin. A comprehensive evaluation criterion of radar ECCM performance based on electronic countermeasure effect matrix[J]. Modern Radar, 2006, 28(1):20-22.
- [164] 卢盈齐, 王颖龙, 祝长英. 基于神经网络的雷达抗干扰效果评估[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(1):77-80.
Lu Yingqi, Wang Yinglong, Zhu Changying. Evaluation on radar anti-jamming effectiveness based on neural network[J]. Fire Control and Command Control, 2006, 31(1):77-80.
- [165] 任明秋, 蔡金燕, 朱元清, 等. 基于证据融合的雷达抗干扰性能多指标综合评估[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2336-2341.
Ren Mingqiu, Cai Jinyan, Zhu Yuanqing, et al. Multi-index synthesis evaluation for radar ECCM capability based on evidence fusion theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10):2336-2341.

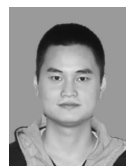
作者简介:



唐斌(1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:电子对抗技术与系统、雷达抗干扰技术, E-mail: bint@uestc.edu.cn.



赵源(1991-),男,博士研究生,研究方向:组网雷达抗有源干扰技术。



蔡天一(1983-),男,博士后,研究方向:雷达导引头突防与对抗技术。



冉智(1993-),男,硕士研究生,研究方向:雷达抗有源干扰技术。



唐娟(1989-),女,硕士研究生,研究方向:雷达有源欺骗干扰反对抗技术。



熊英(1967-),女,教授,研究方向:电子对抗技术与系统、雷达抗干扰技术等。