

单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术进展

马佳智* 施龙飞 徐振海 王雪松

(国防科技大学电子科学学院 CEMEE 国家重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 单脉冲测角是当前主动雷达广泛采用的主流测角技术, 大量应用于警戒跟踪、精确制导等雷达/雷达导引头探测领域。该文简要回顾了主瓣多点源条件下的单脉冲信号处理理论与技术发展历程, 围绕单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术最新成果进行综述, 最后对单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术的未来发展做了展望。

关键词: 单脉冲雷达; 多点源干扰抑制; 多源分辨; 扩展目标估计; 抗干扰

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)01-0125-15

DOI: 10.12000/JR18093

引用格式: 马佳智, 施龙飞, 徐振海, 等. 单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术进展[J]. 雷达学报, 2019, 8(1): 125–139. doi: 10.12000/JR18093.

Reference format: MA Jiazhi, SHI Longfei, XU Zhenhai, *et al.* Overview of multi-source parameter estimation and jamming mitigation for monopulse radars[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(1): 125–139. doi: 10.12000/JR18093.

Overview of Multi-source Parameter Estimation and Jamming Mitigation for Monopulse Radars

MA Jiazhi* SHI Longfei XU Zhenhai WANG Xuesong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Monopulse is a mainstream technique used to acquire the angle information about active radar systems that are widely used in air defense warning, target tracking, and precision guidance. This study briefly reviews the development history of the monopulse theory and technology for the main-lobe multi-source condition. The importance of several key technologies within multi-source parameters estimation and multi-source jamming mitigation is also summarized. Finally, the future development of monopulse technology to resolve the problem of multi-source jamming is considered.

Key words: Monopulse radar; Multi-source jamming; Unresolved targets resolution; Extended targets estimation; Anti-interference

1 引言

单脉冲测角, 也可以称为同时波束比较测角方法, 主要用于雷达系统测量信号的到达方向, 测量对象既可以是主动辐射源, 如信标、干扰机等; 也可以是飞机、舰艇等无源散射体, 是当前跟踪制导雷达广泛采用的主流角度测量技术^[1]。随着雷达探测性能的提升与电子干扰技术的发展, 单脉冲雷达

面临的探测环境日趋复杂, 不仅有自然环境影响, 还有多种样式的人为干扰, 尤其是各种伴随式、自卫式、群目标协同突防等多点源干扰的威胁越来越大。这些新的情况使单脉冲雷达天线主瓣内同时接收到含目标回波与干扰在内的多个信号的几率大为增加, 多个不可分辨的点源信号互相混叠, 导致单脉冲角度测量性能严重下降。如何在主瓣多点源环境中确保单脉冲雷达能够准确获取目标的角度信息, 一直是雷达探测领域的热点和难点问题。

自20世纪60年代起, 主瓣多点源条件下的单脉冲测角理论与技术逐步开始发展, 由于在警戒跟踪、精确制导等雷达探测应用中有重要需求, 相关研究一直持续到今天, 始终得到国内外学术界与工业界的密切关注。本文简要回顾了基于单脉冲系统

收稿日期: 2018-11-07; 改回日期: 2019-02-20

*通信作者: 马佳智 jzmanudt@163.com

*Corresponding Author: MA Jiazhi, jzmanudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(60490692, 61871385)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (60490692, 61871385)

的多点源参数估计、角度干扰抑制理论与技术的发展历程,围绕多点源复单脉冲比特性分析、扩展目标参数估计、群目标角度分辨、低空镜像角闪烁抑制、多点源有源干扰抑制等单脉冲雷达抗多点源干扰关键技术的最新进展进行阐述。

2 多点源复单脉冲比特性分析

在单脉冲雷达3 dB主瓣内,雷达差波束增益与和波束增益的比值随角度产生近似线性变化,故目标回波差信号与和信号的比值,能够表征目标在雷达3 dB主瓣内的精确角度,但当雷达同一信号单元内存在多个不可分辨信源或系统噪声时,该比值为复数,因此也称为复单脉冲比^[1](Complex Monopulse Ratio, CMR),单脉冲处理的核心就是获取目标CMR(根据不同的单脉冲测角体制,提取CMR实部或虚部,如比幅单脉冲提取CMR实部、比相单脉冲提取CMR虚部)。在主瓣多点源条件下,学术界对CMR特性的研究分为两类:确定性分析与统计性分析。

2.1 确定性CMR特性分析

确定性CMR特性分析通过对影响CMR的各因素进行确定性建模,明确给出了不考虑系统噪声时的单次测量CMR与各种影响因素的函数关系。

在基于电磁理论的CMR确定性分析中,常使用“角闪烁”现象来表征多点源场对单脉冲测角的影响,关于“角闪烁”的生成机理,目前存在两种物理解释方式,分别是相位梯度法(基于波前畸变概念)与Poynting矢量法(基于能流倾斜概念)。波前畸变概念由Howard^[2]于1959年首次提出,通过分析线性排列的多个全向散射中心的合成回波相位函数,Howard指出角闪烁是由合成回波信号相位波前畸变所产生的。文献[3]指出多点源合成回波为非球面波,在单脉冲雷达接收天线口面上,相位波前法线产生倾斜,导致角闪烁偏差,并可以用合成回波相位函数的梯度来计算偏差角的大小。与波前畸变概念不同,文献[4]基于对多个共线均匀分布电偶极子的辐射电磁场分析,发现多点源合成信号的Poynting矢量(Poynting矢量即电磁场中的能流密度矢量,假设空间某处电磁强度为 \mathbf{E} ,磁场强度为 \mathbf{H} ,则该处电磁场的Poynting矢量为 $\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}^*$,其中“ \times ”表示叉乘,服从右手螺旋定则,“ $*$ ”表示共轭)存在正交于辐射传播方向的分量,它与电磁波传播方向有一定的倾斜角,由此首次提出了能流倾斜概念,即认为角闪烁现象是多点源合成回波信号在正交于传播方向所产生的能流倾斜现象所导致。Kajinski^[5]首次将极化因素引入到两点源角闪烁分析中,殷红成等人^[6,7]通过联合使用两个任

意取向的电偶极子与磁偶极子来对两点源进行建模,分析两点源极化因素对角闪烁偏差的影响,发现当雷达波长很短或波数很大时,在多点源扩展平面上,相位梯度法与Poynting矢量法等效。

与基于电磁理论的CMR确定性分析不同,基于信号处理的CMR确定性分析直接利用单脉冲系统接收到的和、差信号进行建模。Sherman^[8]于1971年首次提出CMR概念,分析两点源条件下的CMR实部与虚部的关系。文献[9]针对相干2点源角度干扰(交叉眼干扰)模型,进一步完善两点源幅值相位关系、两点源位置关系、单脉冲雷达指向等因素对单脉冲测角的影响效应。对于点源数大于2的情况,Harwood等人^[10]对达成单脉冲测角最大诱偏效果时的多点源相对幅值与相对相位参数条件进行分析。

由于基于电磁理论的CMR确定性分析通过角闪烁来描述多点源对单脉冲测角的诱偏效果,因此未能与单脉冲处理的核心要素CMR建立直观的数学关系。针对这一问题,殷红成等人^[11]从电磁理论出发,推导了比幅单脉冲与比相单脉冲的多点源角闪烁一般表达式,分析多点源角闪烁与单脉冲测角扰动(由系统噪声导致)的内在联系。2013年,Monakov^[12]首次将Poynting矢量方法与CMR求解结合起来,从信号层面建立了CMR与能流倾斜概念的直接联系,对多点源CMR实部与虚部的物理内涵进行诠释,指出CMR实部(采用比相单脉冲体制时,则为虚部)表征了多点源的角度能量质心,CMR虚部(采用比相单脉冲体制时,则为实部)表征了多点源的角度扩展程度(点源分散程度)。

2.2 统计性CMR特性分析

统计性CMR特性分析针对多点源存在散射强度起伏的情况,研究多快拍数据中的CMR统计学描述与统计性特征。

学术界从很早就开始对CMR的统计特性进行研究。文献[13]对热噪声背景下的CMR实部概率密度函数进行推导。Kanter^[14-17]采用特征函数变换的方法,研究了多种多点源情况下的CMR实部概率分布,得到多脉冲累积后的测角结果均值表达式,并分析了CMR的中心矩问题。基于目标服从Swerling 0(非起伏目标)或Swerling II(瑞利目标)起伏模型的假设,Asseo^[18,19]推导了单个目标与双目标情况下CMR实部与虚部的边缘概率密度函数。Tullson^[20]以Swerling II类型起伏目标为研究对象,分析了CMR实部与虚部的概率分布及其均值与方差特性,并考虑接收机通道噪声对Swerling II类型起伏目标的影响。在文献[20]中模型设定的基础上,文献[21]进一

步求解CMR实部与虚部的联合概率密度函数，并提出一种联合使用CMR实部与虚部的优化测角方法。Seifer^[22]对压制噪声干扰中的Swerling II类型起伏目标CMR统计特性进行研究，并结合信号检测理论，提出一种基于CMR起伏程度判据的多点源检测方法。Blair等人^[23]利用多维随机变量变换的方法，给出了存在两个Swerling 0或Swerling II起伏目标时的CMR实部与虚部联合概率密度函数及其1阶矩与2阶矩表达式。文献^[24]使用高斯函数近似法来对Swerling III与Swerling IV起伏目标进行建模，对存在2个Swerling III或Swerling IV起伏目标时的CMR概率分布进行推导。文献^[25–29]基于多通道阵列体制，对多种目标起伏条件下的CMR统计特性进行分析，并以此为理论基础，对扩展目标(多散射中心目标)的角度、尺寸等参数进行估计。文献^[30–33]深入研究起伏目标对相干两/多点源干扰信号角度诱偏的影响效应，建立了相干多点源干扰(双/多源交叉眼干扰)的单脉冲诱偏角度统计性表征模型。文献^[34]将极化因素引入相干多点源干扰建模，分析了相干多点源之间的极化失配效应以及雷达天线与多点源之间的极化失配效应。

3 扩展目标参数估计与群目标分辨

单脉冲雷达的主瓣多点源场景有3种典型情况：第1种是存在一个或多个扩展目标的纯目标多点源场景；第2种是低空多径多点源场景，即低空条件下雷达主瓣内存在一个目标以及该目标回波由地面/海面多径反射形成的虚假镜像；第3种是真实目标与若干有源/无源干扰源同时存在的含人为干扰多点源场景。

针对纯目标多点源场景，现有研究多集中在2个

方面：一是对扩展目标的角度与尺寸参数进行联合估计，其中尺寸参数有助于提升单脉冲雷达的目标识别与目标跟踪性能；二是对不可分辨群目标的数量进行估计，并从混叠信号中提取各目标的角度信息。

3.1 扩展目标参数估计

当雷达3 dB主瓣内只有一个包含多散射中心的扩展目标时，文献^[27,28]使用单脉冲系统和、差通道多快拍数据来估计目标表面多Swerling II散射中心的能量质心与分布范围，继而估计扩展目标的外形尺寸，Nickel等人^[29]继续完善这一类估计算法，对包含多种起伏类型散射中心(Swerling 0 + Swerling I + Swerling II)的扩展目标的角度与散射中心扩展范围进行估计，如图1所示。Glass等人^[35,36]利用扩展目标多散射中心在雷达距离单元上的扩展信息，有效提高扩展目标的检测概率，提高扩展目标角度估计精度并得到目标角度估计精度的克拉美罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)。

3.2 群目标分辨

当雷达3 dB主瓣内存在多个目标时，Blair等人^[37]基于复单脉冲比的概率密度函数，研究了对两个瑞利目标的检测与分辨问题，Sinha等人^[24]通过高斯分布等效，将双瑞利目标角度分辨拓展到其他Swerling起伏模型。Zhang等人^[38,39]考虑了距离分辨单元上匹配滤波器输出信号能量存在泄漏的情况，提出一种最大似然估计(Maximum Likelihood Estimator, MLE)与最小描述长度(Minimum Description Length, MDL)准则相结合的多目标检测与分辨算法，如图2所示。Willetts等人^[40]进一步分析了这种算法对应不同信号波形时分辨性能的精度的CRLB。在此基础上，Issac等人^[41]分析了角度分辨算法与跟踪算法的组合跟踪性能，并基于马尔科夫

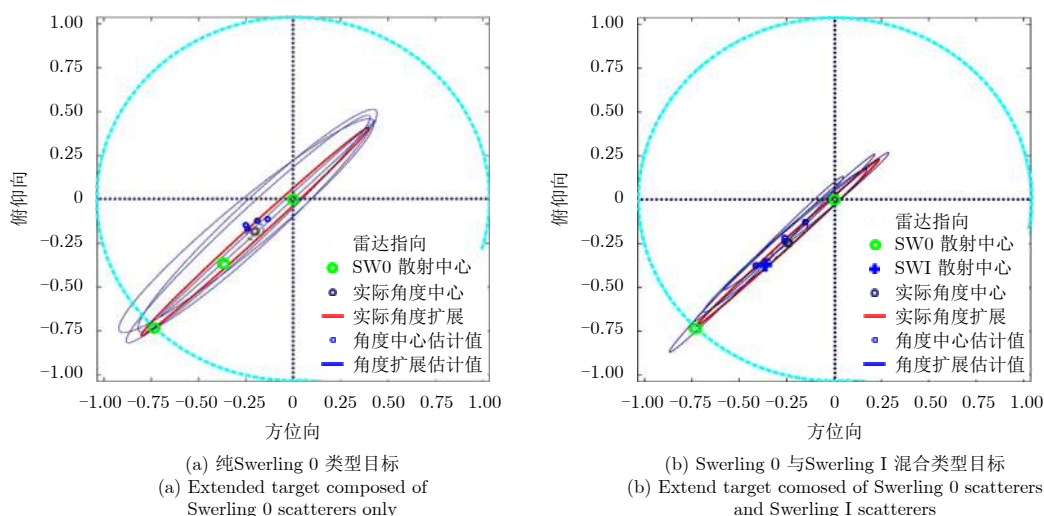


图1 文献^[29]中对两类混合散射中心目标的角度中心与角度扩展的估计结果

Fig. 1 The estimation results of the angle and the extension of two extended targets in Ref. ^[29]

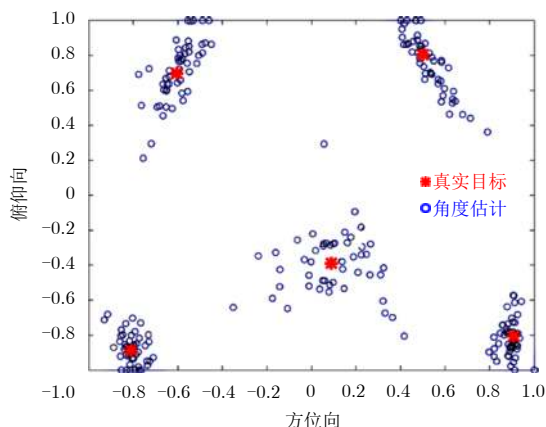


图2 文献[38]中对5个不可分辨目标的角度估计结果

Fig. 2 Angle estimation results of five unresolved targets in Ref. [38]

链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)方法,提出一种粒子滤波器,无需单独进行角度分辨直接完成两个不可分辨目标的跟踪。文献[42]提出另一种粒子滤波器算法,借助跟踪航迹信息辅助,可实现对波束内多于两个目标进行直接跟踪。文献[43]通过一种巧妙的建模方法,得到了Sherman^[8]于1971年提出的两点源CMR解算方法的解析解,可以通过两个脉冲来估计两个不可分辨点源的角度,但这种方法必须满足Sherman条件,即在两个脉冲回波中,两点源回波必须具有相同的幅值比与不同的相位差。Zheng等人^[44]于2003年提出一种基于单脉冲系统“差-差”通道信息,结合正常和、方位差、俯仰差通道信息的4通道双源分辨方法,由于“差-差”通道信号表征两点源方位差信号与俯仰差信号的耦合,因此可以通过求解包含4个复等式的方程组来解算双源角度,Crouse等人^[45]给出了该方法的一种简化计算方式。文献[46]提出一种6通道单脉冲系统设计方案,等效形成两组相互旋转4通道结构,提升了4通道方法的分辨性能。此外,国内学者也对4通道双源分辨方法展开研究。文献[47]设计一种基于交错子阵的双极化4通道单脉冲系统,利用双源信号在空域与极化域耦合关系,改进4通道双源分辨算法,增加其对两点源空域分布的适应性。文献[48]对4通道分辨算法中的双源检测与角度分辨联合处理展开研究。

4 低空镜像角闪烁抑制

单脉冲雷达探测低空目标时,受地面/海面反射信号影响,在接收目标回波信号的同时会有从其他路径进入雷达天线的多径信号,其中最为主要的就是经镜面反射而形成的“镜像”信号^[49]。由于镜像信号到达方向在俯仰上不同于目标直达回波,会对单脉冲雷达仰角测量造成影响。围绕低空镜像角

闪烁问题,学术界在多径反射特性等方面开展研究,并围绕单脉冲雷达低空角闪烁抑制提出了解决思路与技术方法,主要包括:改进单脉冲技术、空域零陷形成技术、高分辨技术和分集捷变技术。

4.1 改进单脉冲技术

改进单脉冲技术的核心思想是:通过修正单脉冲雷达天线方向图,达到消除多径信号的目的。针对低空镜像问题,White^[50]最早提出了对称误差方向图方法,通过产生两个非对称的和、差波束,形成关于镜像和目标角平分线对称的单脉冲比曲线,减弱镜像回波对单脉冲测角的影响。文献[51–53]提出了抑制低空镜像的双零点单脉冲测角方法,通过构建两套分别在目标角度与镜像角度形成空域增益零陷的单脉冲系统,使两次测角结果分别抑制了镜像信号与目标信号,利用镜像对称的多径条件估计目标真实仰角,双零点法的缺点是当目标仰角较小时,镜像抑制效果会显著下降。文献[54]基于阵列雷达波束形成方法,生成最优的对称和、差波束,进而消除多径反射信号对单脉冲比的影响,可使低角跟踪角误差小于1/30主瓣波束宽度。

4.2 空域零陷形成技术

对于多通道阵列体制的单脉冲雷达,可以通过阵列加权,使雷达和、差波束在多径镜像信号入射角度处形成空域增益零陷,达到抑制消除低空信号并校正单脉冲比曲线的目的^[55]。由于低空镜像信号与目标直达信号具有相干特性,且二者相互关系与低空环境密切相关,因此形成方向图空域增益零陷的过程中需要考虑相干信号的影响^[56–58]。

4.3 高分辨技术

由于多径镜像信号的传播路径距离大于目标直达信号的传播路径距离,因此采用距离高分辨技术^[59]在距离维将二者分离后,单脉冲系统对直达目标信号进行角度测量,避免了多径效应引起的角度测量误差。此外,利用直达信号与镜像信号的多普勒频率差,进行多普勒域的高分辨处理也能将二者分离,但实际上,直达信号与镜像信号的多普勒频率差通常很小,必须采用非常长的时间进行相干累积,导致多普勒高分辨技术使用较少^[49]。

4.4 分集捷变技术

分集捷变技术是指利用电磁波在时域、频域、空域、极化域等信息域的特性差异,分别进行信号的发射、接收、处理和合并的方法,通过分集技术能够有效减弱低空镜像对单脉冲测角的影响。当前基于分集技术的单脉冲雷达低空镜像抑制方法主要有:频率分集与极化分集。二者本质上都是希望得到互不相关的多个测角样本,通过数据平均的方法降低单脉冲测角误差的起伏,几种新型的多频双极化单脉冲天线如图3所示。



图3 几种新型的多频双极化单脉冲天线

Fig. 3 Several types of multi-band dual-polarization monopulse antenna

频率分集技术应用最为广泛，大多数近程火控系统都采用了频率分集技术^[63]，频率分集通过载频的改变，使目标各散射点之间的相对相位关系改变，从而使角度测量值产生变化，达到抑制低空镜像角闪烁的目的。频率分集的效果取决于多个角度测量值之间的去相关性，去相关性越强，则抑制角闪烁的效果就越好，这要求分集的带宽足够宽(频率间隔越大去相关性越强)。Mangulis^[64]最早提出利用频率分集方法来解决单脉冲系统低角跟踪问题，基于多频信号角度测量结果加权平均，减小低空镜像引起的单脉冲测角扰动。文献^[65]考虑了目标起伏因素对频率分集雷达低角跟踪的影响。文献^[66,67]基于比相单脉冲测角体制与聚类分析，研究频率分集的最优设计问题。文献^[68]提出一种基于频率分集与最大似然原理的多径抑制方法。Blair等人^[69]提出一种利用多快拍频率分集后单脉冲测角信息的数据融合与目标跟踪算法，在数据处理层面提升单脉冲雷达低角跟踪能力。

极化分集也是近年来较受关注的一个低空镜像抑制技术途径^[70]，通过雷达接收极化分集或发射极化分集，可以改善单脉冲雷达仰角测量性能，但其改善性能取决于目标极化散射矩阵、镜反射系数以及雷达收发极化设置等多种因素。文献^[71]研究了矢量传感器在低角跟踪中的应用，将极化分集方法与频率分集方法进行比较，研究表明：极化分集能够避免频率分集在多径信号与直达信号相位差为 0° 与 180° 时性能恶化的现象。文献^[72]利用两点源相对幅度比对称时角闪烁线偏差互为相反数的特点，通过优化设计雷达发射极化组合使得低空镜像角闪烁得到抑制，相比随机极化分集，文献^[72]中方法具有更良好的角闪烁抑制性能。

5 多点源干扰抑制

当单脉冲雷达3 dB主瓣内存在具有不同角度的目标与一个或多个有源或无源干扰源时，则形成了

多点源角度干扰。针对不同样式的多点源角度干扰，国内外学术界与工业界进行了大量的研究，按技术手段可以分为：多点源特征识别技术、多点源分辨技术、干扰抑制后测角校正技术、发射调制抗诱偏技术和数据融合与抗干扰策略设计。

5.1 多点源特征识别技术

多点源特征识别技术主要利用干扰信号与真实目标回波的多域特征差异进行处理，按照各多点源信号的混叠程度可以分为两种情况：一是当干扰信号与目标回波信号可分辨时，需要对目标回波与干扰信号进行鉴别，以剔除干扰；二是当干扰信号与目标信号不可分辨时，对不可分辨多点源进行存在性检测。

在多点源干扰存在性检测方面，文献^[73]通过提取有无干扰源时雷达接收回波信号的幅度特征差异、以及对应CMR特性变化，推导了两种假设条件下比幅单脉冲系统中CMR的条件概率密度函数，并提出了基于广义最大似然比的拖曳式诱饵存在性检测方法。文献^[74]基于4通道双源分辨方法，提出一种联合使用单脉冲系统“和-方位差-俯仰差-差差”4路通道的拖曳式诱饵存在性检测方法。文献^[75]利用存在和不存在拖曳式干扰时测得的目标极化散射矩阵特征差异，提出了一种转发式拖曳诱饵存在性检测方法，并设计相应的干扰抑制算法。此外，在相干多点源干扰(双/多源交叉眼干扰)的存在性检测方面，文献^[76,77]利用相干两点源干扰与目标回波信号在主极化和交叉极化分量的相对强度差异，实现相干两点源存在性检测。文献^[78]将与目标不可分辨的拖曳式假目标处理分为3个步骤，通过假目标存在性检测、双源角度分辨、角度分辨后真假鉴别3个信号处理环节，实现对拖曳式重叠假目标干扰的抑制。文献^[79,80]通过变极化发射调制目标回波的极化分布，结合多点源极化空间谱特征，在多压制干扰源中检测目标。

在非混叠的干扰信号鉴别方面，主要是对有源

或无源假目标进行识别和剔除。文献[81,82]各自利用DRFM转发干扰信号经延时量化后的中心频谱频移效应与谐波分量细微特征,实现假目标鉴别。文献[83]利用雷达发射信号初相与DRFM转发信号初相的差异特性,结合频域处理实现对多假目标的鉴别与抑制。文献[84-87]对基于极化特征量的假目标鉴别方法展开研究,鉴别对象包括:重复周期(Pulse Repeat Interval, PRI)间恒定极化假目标、PRI内恒定极化假目标、全极化假目标、脉内随机调制极化假目标等多种极化类型的假目标干扰。文献[88]针对“压制+假目标”的组合样式干扰,设计了一种“极化滤波+极化鉴别”的联合抗干扰算法。文献[89,90]提出用主极化分量与交叉极化分量的比值作为舰船目标和箔条干扰的鉴别特征量。李金梁^[91]提出了以极化角为特征量的箔条干扰鉴别方法,汤广富等人^[92]分析了角反射器干扰的极化特性,研究了对角反射器干扰的极化鉴别方法。

5.2 多点源分辨技术

多点源分辨技术是群目标分辨技术在抗干扰应用中的延伸,往往要求多点源信号相互独立、服从某种特定的起伏分布,并限定干扰能量接近目标回波能量。当多点源之间具有相干特性、干信比较高或干扰源采用具有连续遮盖特点的压制式干扰时,这一类算法无法有效估计目标角度,并导致多点源的数量估计失准、角度估计值均值产生偏差、方差显著增大。

5.3 干扰抑制后测角校正技术

当雷达天线主瓣内存在压制式干扰源时,通过对消方法能够实现干扰抑制,如基于波束形成的空域增益零陷技术^[93]、极化滤波技术^[94,95]等,然而这一类抗干扰算法往往会导致单脉冲雷达3 dB主瓣内的单脉冲比曲线产生畸变,使下一步的目标单脉冲

测角结果产生偏差。干扰抑制后测角校正技术主要针对这一问题提出解决方案。

在基于空域处理的干扰抑制后测角校正方面,Nickel^[26]基于阵列雷达最大似然准则,提出一种广义单脉冲测角原理,能够适应任意加权形成的和、差波束,在雷达主瓣内形成空域零陷来抑制主瓣干扰的同时,生成一对对应当前阵列权值的等效和、差信号,并以此完成单脉冲处理。文献[96-98]研究了基于子阵处理的阵列单脉冲雷达空域零陷抗干扰与单脉冲比曲线校正技术。文献[99]利用2维阵列在方位向或俯仰向产生空域零陷时不影响另一维角度域单脉冲比曲线的特点,设计了一种与自适应主瓣空域零陷形成结合的方位/俯仰交替式单脉冲测角方法。文献[100]基于2维阵列,设计了一种多约束和、差波束形成准则,能够在干扰方向形成陡峭的空域零陷,且大幅降低非零陷角度的单脉冲比曲线畸变,如图4。文献[101]综合4通道分辨算法与自适应旁瓣对消算法,在抑制主旁瓣干扰的同时正确估计目标角度,但当主瓣干扰源与目标方位向或俯仰向接近时,该方法的干扰抑制性能下降。文献[102]对空时自适应处理条件下的单脉冲比曲线校正展开研究。文献[103]针对传统反辐射导弹无法有效对抗诱偏干扰的问题,使用空间谱信息对单脉冲测角结果进行修正。

在基于极化域处理的干扰抑制后测角校正方面,宋立众等人^[104]对极化滤波器在单脉冲系统中的应用进行了初步探索,发现极化滤波在和、差通道抑制主瓣干扰后,目标的单脉冲测角结果总是存在一定的偏差,该测角偏差是关于目标与干扰极化参数等参量的多元函数。文献[105]建立新的单脉冲雷达极化滤波输出等效模型,进一步揭示极化滤波器抑制主瓣干扰给单脉冲系统引入测角偏差的内在

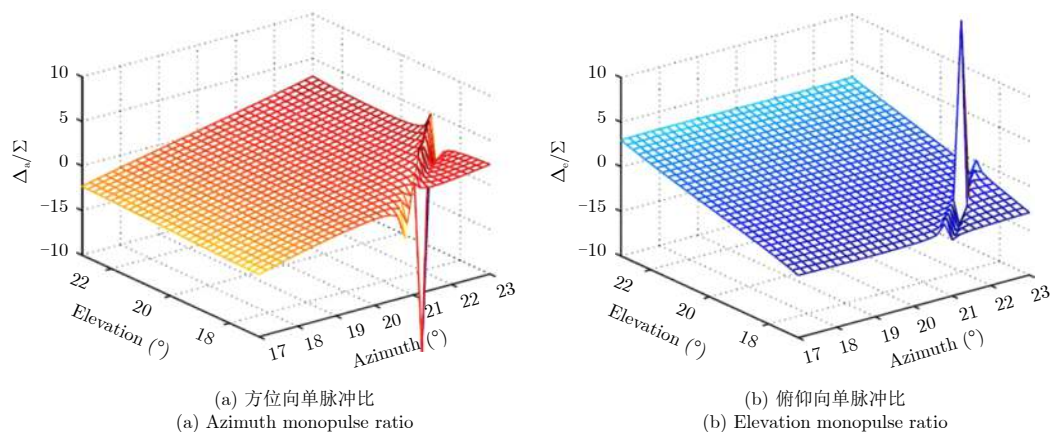


图 4 文献[100]中校正后雷达单脉冲比

Fig. 4 The corrected monopulse ratios after adaptive digital beam forming in Ref. [100]

原因,提出一种基于双重极化滤波处理的角误差消除与目标极化估计方法。文献[106]通过极化滤波与极化综合构建一组表征目标与干扰源角度差异的新和、差信号,使用压制干扰源的角度测量值对新和、差信号单脉冲处理进行补偿,在压制干扰中估计目标角度,且能够适应目标与干扰源角度差异较小的情况。文献[107]通过斜投影极化滤波器抑制箔条质心式角度干扰。

此外,近年来有文献提出使用盲源分离技术实现主瓣干扰抑制,即通过利用目标回波信号与干扰信号之间的波达方向差异与波形差异,从多点源混合信号中提取目标信号。文献[108–113]分别提出了多种盲源分离算法,可以抑制雷达主瓣或通信系统主信道中存在的噪声干扰或密集转发干扰。文献[114]将盲源分离算法应用至单脉冲雷达不同子阵,有效消除多目标回波脉压后距离旁瓣对多目标测角的影响,显著提升单脉冲雷达的多目标测角性能。

5.4 发射调制抗诱偏技术

发射调制抗诱偏技术指,雷达通过发射经特殊调制的信号来扰乱干扰机的信号截获、识别与转发过程,使干扰信号无法有效进入雷达接收机或使干扰效能大幅下降,是射频掩护技术在抗角度诱偏干扰中的一种应用。通过脉间/脉内变频、脉宽调制、重频参差抖动等多种实现样式,使拖曳式/空射式诱饵等角度不同于目标的干扰源所释放的干扰信号不能有效进入单脉冲雷达接收机,进而实现多点源角度干扰抑制。文献[115]分析了射频掩护方法对干扰机接收环节的影响,文献[116]针对应答式干扰提出一种新的射频掩护设计方案。李凤从[117]通过雷达发射波形设计,降低干扰机的截获与转发干扰能力。针对相干多点源干扰(双/多源交叉眼干扰),文献[118]提出一种新的空域变极化发射方式,通过逆向使用单脉冲和、差波束生成原理,使极化单脉冲雷达3 dB主瓣内的发射极化随角度产生显著线性变化,造成相干多点源干扰机(双/多源交叉眼干扰机)内部倒相回路 180° 相移处理产生额外的相位差,破坏多点源间相干特性,使相干多点源干扰角度诱偏性能大幅下降。

5.5 数据融合与抗干扰策略设计

多域数据融合与采用特殊的抗干扰策略,也是单脉冲雷达对抗多点源角度干扰的一种重要手段。白渭雄等人[119]通过对拖曳式诱饵的干扰机理、设计原则、战术使用3个方面的综合分析,提出了防空雷达分离拖曳式诱饵的技术条件。文献[120]基于脉冲多普勒体制,提出一种中远距离情况下通过适当的制导策略,在载机离开雷达波束之前实现载机

和诱饵的多普勒谱线分离的抗诱偏方法。文献[121]综合使用单脉冲导引头测角数据与惯导导航信息对抗箔条质心角度干扰。徐娟等人[122]提出一种联合使用时域、频域、空域的级联导航单脉冲雷达导引头抗干扰方法,其实质是在多域数据融合过程中,给未受到干扰的信息域数据赋予更大的权值。

6 总结与展望

主瓣多点源条件下的单脉冲雷达多源参数估计与抗干扰技术一直是雷达探测领域现实需求强烈、兼具挑战性的难点研究方向。时至今日,虽然学术界与工业界取得了大量的研究成果与阶段性突破,但仍有许多问题需要深入挖掘与进一步探究。

在主瓣多点源构成方面,多点源数量与组成复杂度将进一步提升,典型情况包括:多个压制干扰源、非等功率源(干扰源辐射功率远大于目标回波或多个干扰源分别有不同的发射功率)、相干干扰源、变极化干扰源、多个不同干扰样式干扰源、杂波多径与有源干扰复合等复杂多点源干扰场景。继续探究以上复杂多点源干扰条件下的单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰技术将是未来研究的重点。

在多点源干扰信号表征与解析方面,当前大部分研究成果中,不同雷达测量体制(如比幅单脉冲、比相单脉冲、全极化测量、高分辨信号体制等)与不同干扰样式条件下的多点源干扰数学建模过程间差异较大,造成多点源干扰中基本概念与指标定义出现歧义、混淆,甚至矛盾,尤其是在多点源、多样式干扰复合条件下,导致多点源干扰对单脉冲系统影响机理难以简洁阐明,难以从复杂的理论分析中找到真正有助于抗干扰实现的关键技术途径。因此,继续统一多点源干扰的表征方式与解释理论,提炼多点源干扰对单脉冲系统的核心影响机理,找到能够有效表征多点源多域信息差异的新敏感特征量(基于经典单脉冲结构或设计新的改进单脉冲结构),是这一方向需要继续加强的研究内容。

在单脉冲雷达多点源参数估计与抗干扰新技术方面,当前发展趋势包括:

一是多域联合抗干扰与降维处理技术。利用时-频-空-极化-能量等多个信息域中的多点源信号差异,使用多域信号处理方法能够取得单一信息域抗干扰方法难以取得的抗干扰效果。然而充分使用多域信息必然导致系统复杂度上升,为了提高相关算法的实时性并降低系统成本,必然需要采用降维处理(如使用子阵级和、差波束形成代替阵元级和差、波束形成)。此外,如何有效利用同时接收到的多通道、多频段、全极化回波信息,有效提升系统资源利用率及整体抗干扰性能,还需要进一步研究。

二是基于多维特征的信息提取技术。由于电子干扰技术的进步,干扰源功率不断提升,现有基于能量抑制的抗干扰方法无法完全对消干扰信号,因此这里不再以抑制干扰能量提高目标信噪比为核心要求,而是把干扰、目标都作为“待鉴别信号”,进一步利用有源干扰与雷达目标在多信息域的多维特征差异判定其二元属性,同时利用这些特征的时变特性与分布特性,检测目标并提取目标参数信息。

三是多点源多域差异的主动控制技术。通过对雷达的发射与接收进行特殊调制,增强真实目标回波与多点源干扰间的信号差异,锐化二者间的多维特征差异,进而取得更好的多目标分辨与多点源干扰抑制效果。

四是新体制雷达中的单脉冲测角技术。通过拓展单脉冲技术在新体制雷达中的应用,利用新体制雷达在多点源探测中的后发优势,抑制多点源干扰对雷达角度测量的影响,如单脉冲技术与频率控制阵列技术结合^[123]、单脉冲技术与前斜视成像技术结合^[124]等。

参 考 文 献

- [1] SHERMAN S M and BARTON D K. Monopulse Principles and Techniques[M]. Norwood, MA: Artech House, 2011: 1–18.
- [2] HOWARD D D. Radar target glint in tracking and guidance system based on echo signal phase distortion[J]. *Proceedings of NEC*, 1959, 15: 840–849.
- [3] LINDSAY J E. Angular glint and the moving, rotating, complex radar target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1968, AES-4(2): 164–173. doi: [10.1109/TAES.1968.5408954](https://doi.org/10.1109/TAES.1968.5408954).
- [4] DUNN H H and HOWARD D D. Radar target amplitude, angle, and Doppler scintillation from analysis of the echo signal propagating in space[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1968, 16(9): 715–728. doi: [10.1109/TMTT.1968.1126776](https://doi.org/10.1109/TMTT.1968.1126776).
- [5] KAJENSKI P J. Comparison of two theories of angle glint: Polarization considerations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 206–210. doi: [10.1109/TAES.2006.1603415](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603415).
- [6] YIN Hongcheng and HUANG Peikang. Unification and comparison between two concepts of radar target angular glint[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(2): 778–783. doi: [10.1109/7.381924](https://doi.org/10.1109/7.381924).
- [7] YIN Hongcheng and HUANG Peikang. Further comparison between two concepts of radar target angular glint[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(1): 372–380. doi: [10.1109/TAES.2008.4517012](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4517012).
- [8] SHERMAN S M. Complex indicated angles applied to unresolved radar targets and multipath[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7(1): 160–170. doi: [10.1109/TAES.1971.310264](https://doi.org/10.1109/TAES.1971.310264).
- [9] DU PLESSIS W P, ODENDAAL J W, and JOUBERT J. Extended analysis of retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(9): 2803–2806. doi: [10.1109/TAP.2009.2027353](https://doi.org/10.1109/TAP.2009.2027353).
- [10] HARWOOD N M, DAWBER W N, KING D J, et al. Multiple-element crosseye[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(1): 67–73. doi: [10.1049/iet-rsn:20060042](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20060042).
- [11] 殷红成, 王超, 黄培康. 雷达目标角闪烁三种表示的内在联系(英文)[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 119–128. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14025](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14025).
YIN Hongcheng, WANG Chao, and HUANG Peikang. Inherent relations among the three representations of radar target angular glint[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 119–128. doi: [10.3724/SP.J.1300.2014.14025](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2014.14025).
- [12] MONAKOV A. Physical and statistical properties of the complex monopulse ratio[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 960–968. doi: [10.1109/TAES.2013.6494392](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6494392).
- [13] SHARENSEN S. Angle estimation accuracy with a monopulse radar in the search mode[J]. *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, 1962, ANE-9(3): 175–179. doi: [10.1109/TANE3.1962.4201876](https://doi.org/10.1109/TANE3.1962.4201876).
- [14] KANTER I. Multiple Gaussian targets: The track-on-jam problem[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1977, AES-13(6): 620–623. doi: [10.1109/TAES.1977.308502](https://doi.org/10.1109/TAES.1977.308502).
- [15] KANTER I. Corrections to “multiple Gaussian targets: The track-on-jam problem”[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1978, AES-14(3): 544. doi: [10.1109/TAES.1978.308619](https://doi.org/10.1109/TAES.1978.308619).
- [16] KANTER I. Varieties of average monopulse responses to multiple targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, AES-17(1): 25–28. doi: [10.1109/TAES.1981.309032](https://doi.org/10.1109/TAES.1981.309032).
- [17] KANTER I. The probability density function of the monopulse ratio for n looks at a combination of constant and Rayleigh targets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1977, 23(5): 643–648. doi: [10.1109/TIT.1977.1055778](https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055778).
- [18] ASSEO S J. Effect of monopulse signal thresholding on tracking multiple targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10(4): 504–509. doi: [10.1109/TAES.1974.307805](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307805).
- [19] ASSEO S J. Corrections to “detection of target

- multiplicity using monopulse quadrature angle”[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, AES-17(6): 466–468. doi: [10.1109/TAES.1981.309077](https://doi.org/10.1109/TAES.1981.309077).
- [20] TULLSSON B E. Monopulse tracking of Rayleigh targets: A simple approach[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(3): 520–531. doi: [10.1109/7.81434](https://doi.org/10.1109/7.81434).
- [21] GROVES G W, BLAIR W D, and CHOW W C. Probability distribution of complex monopulse ratio with arbitrary correlation between channels[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(4): 1345–1350. doi: [10.1109/7.625136](https://doi.org/10.1109/7.625136).
- [22] SEIFER A D. Monopulse-radar angle tracking in noise or noise jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1992, 28(3): 622–638. doi: [10.1109/7.256285](https://doi.org/10.1109/7.256285).
- [23] BLAIR W D and BRANDT-PEARCE M. Unresolved Rayleigh target detection using monopulse measurements[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 543–552. doi: [10.1109/7.670335](https://doi.org/10.1109/7.670335).
- [24] SINHA A, KIRUBARAJAN T, and BAR-SHALOM Y. Maximum likelihood angle extractor for two closely spaced targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 183–203. doi: [10.1109/7.993239](https://doi.org/10.1109/7.993239).
- [25] NICKEL U. Performance of corrected adaptive monopulse estimation[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(1): 17–24. doi: [10.1049/ip-rsn:19990257](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:19990257).
- [26] NICKEL U. Overview of generalized monopulse estimation[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, 21(6): 27–56. doi: [10.1109/MAES.2006.1662039](https://doi.org/10.1109/MAES.2006.1662039).
- [27] NICKEL U R O, CHAUMETTE E, and LARZABAL P. Statistical performance prediction of generalized monopulse estimation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 381–404. doi: [10.1109/TAES.2011.5705682](https://doi.org/10.1109/TAES.2011.5705682).
- [28] CHAUMETTE E, NICKEL U, and LARZABAL P. Detection and parameter estimation of extended targets using the generalized monopulse estimator[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3389–3417. doi: [10.1109/TAES.2012.6324719](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6324719).
- [29] NICKEL U, CHAUMETTE E, and LARZABAL P. Estimation of extended targets using the generalized monopulse estimator: Extension to a mixed target model[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 2084–2096. doi: [10.1109/TAES.2013.6558043](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6558043).
- [30] DU PLESSIS W P. Platform skin return and retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 490–501. doi: [10.1109/TAES.2012.6129650](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129650).
- [31] DU PLESSIS W P. Cross-eye gain in multiloop retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 875–882. doi: [10.1109/TAES.2016.140112](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140112).
- [32] LIU Tianpeng, LIAO Dongping, and WEI Xizhang. Performance analysis of multiple-element retrodirective cross-eye jamming based on linear array[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 1867–1876. doi: [10.1109/TAES.2015.140035](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140035).
- [33] LIU Tianpeng, LIU Zhen, LIAO Dongping, et al. Platform skin return and multiple-element linear retrodirective cross-eye jamming[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(2): 821–835. doi: [10.1109/TAES.2016.140949](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140949).
- [34] MA Jiazhi, SHI Longfei, CUI Gang, et al. Further analysis of retrodirective cross-eye jamming: Polarization considerations[C]. Proceedings of the 12th European Conference on Antennas and Propagation, London, UK, 2018: 1–5. doi: [10.1049/cp.2018.1252](https://doi.org/10.1049/cp.2018.1252).
- [35] GLASS J D and BLAIR W D. Detection of Rayleigh targets using adjacent matched filter samples[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(3): 1927–1941. doi: [10.1109/TAES.2015.140683](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140683).
- [36] GLASS J D, BLAIR W D, and LANTERMAN A D. Joint-bin monopulse processing of Rayleigh targets[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(24): 6673–6683. doi: [10.1109/TSP.2015.2478749](https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2478749).
- [37] BLAIR W D and BRANDT-PEARCE M. Monopulse DOA estimation of two unresolved Rayleigh targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 452–469. doi: [10.1109/7.937461](https://doi.org/10.1109/7.937461).
- [38] ZHANG Xin, WILLETT P K, and BAR-SHALOM Y. Monopulse radar detection and localization of multiple unresolved targets via joint bin processing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(4): 1225–1236. doi: [10.1109/TSP.2005.843732](https://doi.org/10.1109/TSP.2005.843732).
- [39] ZHANG Xin, WILLETT P, and BAR-SHALOM Y. Detection and localization of multiple unresolved extended targets via monopulse radar signal processing[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 455–472. doi: [10.1109/TAES.2009.5089534](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5089534).
- [40] WILLETT P, BLAIR W D, and ZHANG Xin. The multitarget monopulse CRLB for matched filter samples[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(8): 4183–4197. doi: [10.1109/TSP.2007.894405](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.894405).

- [41] ISAAC A, WILLET P, and BAR-SHALOM Y. MCMC methods for tracking two closely spaced targets using monopulse radar channel signals[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(3): 221–229. doi: [10.1049/iet-rsn:20060117](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20060117).
- [42] NANDAKUMARAN N, SINHA A, and KIRUBARAJAN T. Joint detection and tracking of unresolved targets with monopulse radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(4): 1326–1341. doi: [10.1109/TAES.2008.4667712](https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4667712).
- [43] LEE S P, CHO B L, LEE S M, et al. Unambiguous angle estimation of unresolved targets in monopulse radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(2): 1170–1177. doi: [10.1109/TAES.2014.140178](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.140178).
- [44] ZHENG Yibin, TSENG S M, and YU K B. Closed-form four-channel monopulse two-target resolution[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 1083–1089. doi: [10.1109/TAES.2003.1238760](https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1238760).
- [45] CROUSE D F, NICKEL U, and WILLET P. Comments on “closed-form four-channel monopulse two-target resolution”[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 913–916. doi: [10.1109/TAES.2012.6129678](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6129678).
- [46] JARDAK S, AHMED S, and ALOUINI M S. Generalised two target localisation using passive monopulse radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(6): 932–936. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0495](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0495).
- [47] MA Jiazhi, SHI Longfei, and LIU Jian. Improved two-targets resolution using dual-polarization radar with interlaced subarray partition[C]. Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Yangzhou, China, 2017: 397–400. doi: [10.1109/ICEMI.2017.8265831](https://doi.org/10.1109/ICEMI.2017.8265831).
- [48] 戴幻尧, 王建路, 韩慧, 等. 基于对角差信号的单脉冲雷达二维角估计新方法[J]. *现代雷达*, 2017, 39(1): 22–25, 31. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.01.005](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.01.005).
DAI Huanyao, WANG Jianlu, HAN Hui, et al. Two dimension DOA estimation method of monopulse radar based on diagonal difference channel signal[J]. *Modern Radar*, 2017, 39(1): 22–25, 31. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.01.005](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2017.01.005).
- [49] 徐振海, 肖顺平, 熊子源. 阵列雷达低角跟踪技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
XU Zhenhai, XIAO Shunping, and XIONG Ziyuan. Low Angle Tracking Techniques for Array Radars[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [50] WHITE W D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10(6): 835–852. doi: [10.1109/TAES.1974.307892](https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307892).
- [51] WHITE W D. Double null technique for low angle tracking[J]. *Microwave Journal*, 1976, 19(12): 35–38, 60.
- [52] 徐振海, 熊子源, 宋聃, 等. 阵列雷达双零点单脉冲低角跟踪算法[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(1): 130–135. doi: [10.11887/j.cn.201501022](https://doi.org/10.11887/j.cn.201501022).
XU Zhenhai, XIONG Ziyuan, SONG Dan, et al. Double-null monopulse low-angle tracking algorithm with array radars[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(1): 130–135. doi: [10.11887/j.cn.201501022](https://doi.org/10.11887/j.cn.201501022).
- [53] SEBT M A, SHEIKHI A, and NAYEBI M M. Robust low-angle estimation by an array radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(6): 780–790. doi: [10.1049/iet-rsn.2009.0067](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2009.0067).
- [54] XU Zhenhai, XIONG Ziyuan, WU Jiani, et al. Symmetrical difference pattern monopulse for low-angle tracking with array radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, 52(6): 2676–2684. doi: [10.1109/TAES.2016.140436](https://doi.org/10.1109/TAES.2016.140436).
- [55] 赵英俊, 李荣峰, 王永良, 等. 基于主瓣多径干扰抑制的米波雷达测角方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(4): 51–55. doi: [10.13245/j.husst.2013.04.014](https://doi.org/10.13245/j.husst.2013.04.014).
ZHAO Yingjun, LI Rongfeng, WANG Yongliang, et al. Angles measurement of meter-wave radars by mainlobe multipath jamming suppression[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(4): 51–55. doi: [10.13245/j.husst.2013.04.014](https://doi.org/10.13245/j.husst.2013.04.014).
- [56] PARK D, YANG E, AHN S, et al. Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 2564–2577. doi: [10.1109/TAES.2014.130185](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130185).
- [57] 朱伟, 陈伯孝. 强相干干扰下微弱信号波达方向估计[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2): 212–219. doi: [10.13443/j.cjors.2013.02.019](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013.02.019).
ZHU Wei and CHEN Baixiao. Weak signal DOA estimation under coherent intensive interferences[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2): 212–219. doi: [10.13443/j.cjors.2013.02.019](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013.02.019).
- [58] DARVISHI H and SEBT M A. Adaptive hybrid method for low-angle target tracking in multipath[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(9): 931–937. doi: [10.1049/iet-rsn.2018.5114](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2018.5114).
- [59] SHANG She, ZHANG Shouhong, and ZHANG Xiushe. Investigation on low-angle tracking technique for HRR radar[C]. Proceedings of 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings, Beijing, China, 2001:

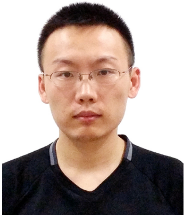
- 839–842. doi: 10.1109/ICR.2001.984842.
- [60] HU Jingyuan, ZHAO Guoqiang, and SUN Houjun. A dual polarization multi-layer array antenna used by digital system[C]. Proceedings of 2015 Asia-Pacific Microwave Conference, Nanjing, China, 2015, 3: 1–3. doi: 10.1109/APMC.2015.7413305.
- [61] LI Teng, MENG Hongfu, and DOU Wenbin. Design and implementation of dual-frequency dual-polarization slotted waveguide antenna array for Ka-band application[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, 13: 1317–1320. doi: 10.1109/LAWP.2014.2337355.
- [62] HASANI H, PEIXEIRO C, SKRIVERVIK A K, *et al.* Single-layer quad-band printed reflectarray antenna with dual linear polarization[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(12): 5522–5528. doi: 10.1109/TAP.2015.2481918.
- [63] NERI F. Introduction to Electronic Defense Systems[M]. Boston, MA: Artech House, 2001.
- [64] MANGULIS V. Frequency diversity in low-angle radar tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1981, AES-17(1): 149–153. doi: 10.1109/TAES.1981.309050.
- [65] BOSSE E, TURNER R M, and RISEBOROUGH E S. Model-based multifrequency array signal processing for low-angle tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 31(1): 194–210. doi: 10.1109/7.366303.
- [66] ZHOU Jie, WANG Jianming, and XING Wenge. Study on low-angle tracking technique for shipboard phased array radar[C]. Proceedings of 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1–4. doi: 10.1109/ICR.2006.343591.
- [67] ZHANG Y D, LI Xin, and AMIN G M. Target localization in multipath environment through the exploitation of multi-frequency array[C]. Proceedings of 2010 International Waveform Diversity and Design Conference, Niagara Falls, Canada, 2010: 206–210. doi: 10.1109/WDD.2010.5592512.
- [68] ZHU Yutang, ZHAO Yongbo, and SHUI Penglang. Low-angle target tracking using frequency-agile refined maximum likelihood algorithm[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(3): 491–497. doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0301.
- [69] BLAIR W D, GROVES G W, BAR-SHALOM Y, *et al.* Frequency agility and fusion for tracking targets in the presence of multipath propagation[C]. Proceedings of 1994 IEEE National Radar Conference, Atlanta, GA, USA, 1994: 166–170. doi: 10.1109/NRC.1994.328118.
- [70] 施龙飞. 雷达极化抗干扰技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2007.
- SHI Longfei. Study on the suppression of interference with radar polarization information[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [71] KWAK H, YANG E, and CHUN H. Vector sensor arrays in DOA estimation for the low angle tracking[C]. Proceedings of 2007 International Waveform Diversity and Design Conference, Pisa, Italy, 2007: 183–187. doi: 10.1109/WDDC.2007.4339406.
- [72] 施龙飞, 王雪松, 肖顺平. 低空镜像角闪烁的极化抑制[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1038–1044. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.06.005.
- SHI Longfei, WANG Xuesong, and XIAO Shunping. Depressing of angle glint of low-altitude enantiomorphous target by polarization diversity[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2008, 23(6): 1038–1044. doi: 10.3969/j.issn.1005-0388.2008.06.005.
- [73] 宋志勇, 肖怀铁, 祝依龙, 等. 基于扩展单脉冲比的拖曳式诱饵存在性检测[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1656–1668.
- SONG Zhiyong, XIAO Huaitie, ZHU Yilong, *et al.* Detection of presence of towed radar active decoy based on extended monopulse ratio[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(9): 1656–1668.
- [74] 王建路, 戴幻尧, 韩慧, 等. 雷达导引头对拖曳式诱饵干扰的检测和识别新方法[J]. 航天电子对抗, 2016, 32(6): 5–8, 28. doi: 10.16328/j.htdz8511.2016.06.002.
- WANG Jianlu, DAI Huanyao, HAN Hui, *et al.* A new method for detection and recognition of towed decoy jamming by radar seeker[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2016, 32(6): 5–8, 28. doi: 10.16328/j.htdz8511.2016.06.002.
- [75] 李永祯, 胡万秋, 孙豆, 等. 一种基于极化信息的机载拖曳式诱饵存在性检测与抑制方法研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 666–672. doi: 10.12000/JR16115.
- LI Yongzhen, HU Wanqiu, SUN Dou, *et al.* Scheme for polarization detection and suppression of TRAD[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 666–672. doi: 10.12000/JR16115.
- [76] 李永祯, 胡万秋, 程旭, 等. 相干两点源角欺骗干扰的极化鉴别方法研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1078–1083. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.004.
- LI Yongzhen, HU Wanqiu, CHENG Xu, *et al.* Research on polarization discrimination algorithm for coherent dual-source angle deception interference[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(9): 1078–1083. doi: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.004.
- [77] 宗志伟, 李永祯, 施龙飞, 等. 全极化雷达相干两点源角度欺骗干扰识别方法[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 621–626. doi: 10.13443/j.cjors.2013071201.
- ZONG Zhiwei, LI Yongzhen, SHI Longfei, *et al.* Discrimination method for coherent dual point sources

- angular deception using fully polarimetric radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(4): 621–626. doi: [10.13443/j.cjors.2013071201](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2013071201).
- [78] 马佳智. 极化雷达导引头多点源参数估计与抗干扰技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2017.
- MA Jiazhi. Study on multi-sources parameter estimation and jamming mitigation for polarimetric radar seeker[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2017.
- [79] 施龙飞, 毛楚乔, 张建明, 等. 基于极化-空间谱特征的雷达目标检测方法[J]. *雷达科学与技术*, 2018, 16(2): 174–180. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.02.010).
- SHI Longfei, MAO Chuqiao, ZHANG Jianming, *et al.* A target detection method based on polarization-space joint spectrum characteristic[J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(2): 174–180. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.02.010).
- [80] 胥文泉, 施龙飞, 肖顺平. 基于相位分集的目标极化特征检测方法[J]. *雷达科学与技术*, 2018, 16(3): 275–280, 285. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.007).
- XU Wenquan, SHI Longfei, and XIAO Shunping. A target detection method with polarization characteristic based on phase diversity[J]. *Radar Science and Technology*, 2018, 16(3): 275–280, 285. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.007).
- [81] GRECO M, GINI F, and 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. doi: [10.1109/TSP.2007.909326](https://doi.org/10.1109/TSP.2007.909326).
- [82] 卢龙云, 李明, 陈洪猛, 等. 基于奇异谱分析的抗数字射频存储距离波门拖引干扰[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(3): 600–606. doi: [10.11999/JEIT150550](https://doi.org/10.11999/JEIT150550).
- LU Longyun, LI Ming, CHEN Hongmeng, *et al.* Countering DRFM range gate pull-off jamming based on singular spectrum analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 600–606. doi: [10.11999/JEIT150550](https://doi.org/10.11999/JEIT150550).
- [83] ZHANG Jindong, ZHU Daiyin, and ZHANG Gong. New antivelocity deception jamming technique using pulses with adaptive initial phases[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1290–1300. doi: [10.1109/TAES.2013.6494414](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6494414).
- [84] 李永祯. 瞬态极化统计特性及处理的研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2004.
- LI Yongzhen. Study on statistical characteristics and processing of instantaneous polarization[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2004.
- [85] 王涛. 弹道中段目标极化域特征提取与识别[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2006.
- WANG Tao. Feature extraction and recognition of targets in ballistic midcourse in polarization-domain[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2006.
- [86] SHI Longfei, WANG Xuesong, and XIAO Shunping. Polarization discrimination between repeater false-target and radar target[J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(1): 149–158. doi: [10.1007/s11432-009-0009-9](https://doi.org/10.1007/s11432-009-0009-9).
- [87] ZONG Zhiwei, SHI Longfei, and WANG Xuesong. Commonality used to discriminate active repetition false targets based on polarisation characteristics of antenna[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(7): 1178–1185. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0421](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0421).
- [88] 宗志伟. 弹道中段目标极化雷达识别方法[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2016.
- ZONG Zhiwei. Discrimination methods for ballistic targets base on polarization radar[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2016.
- [89] 沈允春, 谢俊好, 刘庆普. 识别箔条云新方案[J]. *系统工程与电子技术*, 1995(4): 60–63. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1995.04.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1995.04.011).
- SHEN Yunchun, XIE Junhao, and LIU Qingpu. A novel scheme for identifying chaff interference[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1995(4): 60–63. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1995.04.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1995.04.011).
- [90] 刘庆普, 沈允春. 箔条云极化识别方案性能分析[J]. *系统工程与电子技术*, 1996(11): 1–7. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1996.11.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1996.11.001).
- LIU Qingpu and SHEN Yunchun. Performance analysis of identifying chaff interference using polarization characteristics[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1996(11): 1–7. doi: [10.3321/j.issn:1001-506X.1996.11.001](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-506X.1996.11.001).
- [91] 李金梁. 箔条干扰的特性与雷达抗箔条技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2010.
- LI Jinliang. Study on characteristics of chaff jamming and anti-chaff technology for radar[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010.
- [92] 朱珍珠, 汤广富, 程翥, 等. 基于极化分解的舰船和角反射器鉴别方法[J]. *舰船电子对抗*, 2010, 33(6): 15–21. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2010.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2010.06.003).
- ZHU Zhenzhen, TANG Guangfu, CHENG Zhu, *et al.* Discrimination method of ship and corner reflector based on polarization decomposition[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2010, 33(6): 15–21. doi: [10.3969/j.issn.1673-9167.2010.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-9167.2010.06.003).
- [93] YU K B and MURROW D J. Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming[J]. *IEEE*

- Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 508–523. doi: [10.1109/7.937465](https://doi.org/10.1109/7.937465).
- [94] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 119–131. doi: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
- WANG Xuesong. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119–131. doi: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
- [95] 施龙飞, 任博, 马佳智, 等. 雷达极化抗干扰技术进展[J]. 现代雷达, 2016, 38(4): 1–7, 29. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001).
- SHI Longfei, REN Bo, MA Jiazhi, *et al.* Recent developments of radar anti-interference techniques with polarimetry[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(4): 1–7, 29. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.001).
- [96] 胡航. 现代相控阵雷达阵列处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- HU Hang. *Array Processing Techniques for Modern Phased Array Radar*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [97] 邱朝阳, 雷丽丽, 胡航, 等. 子阵级相控阵差波束旁瓣抑制新方法[J]. 电波科学学报, 2011, 26(1): 13–17, 202. doi: [10.3969/j.issn.1005-0388.2011.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0388.2011.01.003).
- QIU Chaoyang, LEI Lili, HU Hang, *et al.* Novel approach of sidelobe suppression for difference beam of phased array at subarray level[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2011, 26(1): 13–17, 202. doi: [10.3969/j.issn.1005-0388.2011.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0388.2011.01.003).
- [98] 李荣锋, 饶灿, 戴凌燕, 等. 子阵间约束自适应和差单脉冲测角算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 6–10. doi: [10.13245/j.hust.2013.09.013](https://doi.org/10.13245/j.hust.2013.09.013).
- LI Rongfeng, RAO Can, DAI Lingyan, *et al.* Algorithm for constrained adaptive sum-difference monopulse among sub-arrays[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(9): 6–10. doi: [10.13245/j.hust.2013.09.013](https://doi.org/10.13245/j.hust.2013.09.013).
- [99] CHEN Xinzhu, SHU Ting, YU K B, *et al.* Enhanced ADBF architecture for monopulse angle estimation in multiple jamming[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2684–2687. doi: [10.1109/LAWP.2017.2740958](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2740958).
- [100] CHENG Ziyang, HE Zishu, DUAN Xiang, *et al.* Adaptive monopulse approach with joint linear constraints for planar array at subarray level[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1432–1441. doi: [10.1109/TAES.2018.2793318](https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2793318).
- [101] 周必雷, 李荣锋, 戴凌燕, 等. 和差四通道及辅助阵元联合自适应单脉冲方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(9): 1905–1914. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.09.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.09.01).
- ZHOU Bilei, LI Rongfeng, DAI Lingyan, *et al.* Adaptive monopulse algorithm combining four-channel sum-difference beam and auxiliary elements[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2017, 39(9): 1905–1914. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2017.09.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2017.09.01).
- [102] 陈功, 谢文冲, 王永良. 基于空时联合约束的机载雷达STAP单脉冲角度估计方法[J]. 电子学报, 2015, 43(3): 489–495. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.011).
- CHEN Gong, XIE Wenchong, and WANG Yongliang. Space-time adaptive monopulse angle estimation approach for airborne radar based on space-time joint constraint[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(3): 489–495. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2015.03.011).
- [103] 刘义, 赵志超, 王雪松, 等. 反辐射导弹复合测角抗诱偏干扰方法[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2122–2127. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.063](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.063).
- LIU Yi, ZHAO Zhichao, WANG Xuesong, *et al.* Approach of anti-decoy based on complex angle measuring system[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5): 2122–2127. doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.063](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2009.05.063).
- [104] 宋立众, 乔晓林, 孟宪德. 一种单脉冲雷达中的极化估值与滤波算法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 764–766. doi: [10.3321/j.issn.1001-506X.2005.05.002](https://doi.org/10.3321/j.issn.1001-506X.2005.05.002).
- SONG Lizhong, QIAO Xiaolin, and MENG Xiande. Algorithm of polarization estimation and filtering for mono-pulse radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 27(5): 764–766. doi: [10.3321/j.issn.1001-506X.2005.05.002](https://doi.org/10.3321/j.issn.1001-506X.2005.05.002).
- [105] MA Jiazhi, SHI Longfei, LI Yongzhen, *et al.* Angle estimation of extended targets in main-lobe interference with polarization filtering[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(1): 169–189. doi: [10.1109/TAES.2017.2649783](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2649783).
- [106] MA Jiazhi, SHI Longfei, LI Yongzhen, *et al.* Angle estimation with polarization filtering: A single snapshot approach[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(1): 257–268. doi: [10.1109/TAES.2017.2756218](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2756218).
- [107] YANG Yong, XIAO Shunping, FENG Dejun, *et al.* Polarisation oblique projection for radar seeker tracking in chaff centroid jamming environment without prior knowledge[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(9): 1195–1202. doi: [10.1049/iet-rsn.2013.0388](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2013.0388).
- [108] 王文涛, 张剑云, 李小波, 等. Fast ICA应用于雷达抗主瓣干扰算法研究[J]. 信号处理, 2015, 31(4): 497–503. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2015.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2015.04.016).
- WANG Wentao, ZHANG Jianyun, LI Xiaobo, *et al.* A study on radar mainlobe jamming suppression algorithm based on fast ICA[J]. *Journal of Signal Processing*, 2015, 31(4): 497–503. doi: [10.3969/j.issn.1003-0530.2015.04.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0530.2015.04.016).

- [109] 温媛媛, 陈豪. 基于时域卷积盲信号分离的雷达干扰抑制算法[J]. 中国科学院大学学报, 2013, 30(4): 523–527. doi: [10.7523/j.issn.2095-6134.2013.04.014](https://doi.org/10.7523/j.issn.2095-6134.2013.04.014).
WEN Yuanyuan and CHEN Hao. Algorithm of radar interference suppression based on blind signal separation in the time domain[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2013, 30(4): 523–527. doi: [10.7523/j.issn.2095-6134.2013.04.014](https://doi.org/10.7523/j.issn.2095-6134.2013.04.014).
- [110] WASHIZAWA Y, YAMASHITA Y, TANAKA T, *et al*. Blind extraction of global signal from multi-channel noisy observations[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2010, 21(9): 1472–1481. doi: [10.1109/TNN.2010.2052828](https://doi.org/10.1109/TNN.2010.2052828).
- [111] 王瑜, 李小波, 周青松, 等. 联合BSS和FRFT的雷达抗主瓣干扰新方法[J]. 现代雷达, 2016, 38(7): 72–77. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.07.018](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.07.018).
WANG Yu, LI Xiaobo, ZHOU Qingsong, *et al*. A new method of radar main lobe interference based on the combination of BSS and FRFT[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(7): 72–77. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.07.018](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.07.018).
- [112] LI Jiong, ZHANG Hang, and ZHANG Jiang. Fast adaptive BSS algorithm for independent/dependent sources[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(11): 2221–2224. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2598144](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2598144).
- [113] 周必雷, 李荣锋, 陈风波, 等. 基于盲分离的空时联合处理抗复合干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2393–2402. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.01).
ZHOU Bilei, LI Rongfeng, CHEN Fengbo, *et al*. Space-time complex-jamming suppression algorithm based on the BSS[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(11): 2393–2402. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.01](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.11.01).
- [114] LEE S H, LEE S J, CHOI I O, *et al*. ICA-based phase-comparison monopulse technique for accurate angle estimation of multiple targets[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2018, 12(3): 323–331. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0156](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0156).
- [115] 周伟江, 王培强, 张进, 等. 雷达射频掩护信号分析及对抗方法研究[J]. 航天电子对抗, 2013, 29(5): 47–50. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.05.014).
ZHOU Weijiang, WANG Peiqiang, ZHANG Jin, *et al*. Analysis and countermeasures of radar radio frequency-screen signal[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2013, 29(5): 47–50. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2013.05.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2013.05.014).
- [116] 金珊珊, 王春阳, 邱程, 等. 对抗应答式干扰的射频掩护脉冲设计[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(4): 377–381. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2014.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2014.04.010).
JIN Shanshan, WANG Chunyang, QIU Cheng, *et al*. Design of RF protecting signal for transponder jamming suppression[J]. *Journal of CSEIT*, 2014, 9(4): 377–381. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2014.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2014.04.010).
- [117] 李凤从. 雷达抗干扰波形优化设计的研究[D]. [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Fengcong. Research on anti-interference waveform optimization for radar[D]. [Ph.D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2014.
- [118] MA Jiazhi, SHI Longfei, XIAO Shunping, *et al*. Mitigation of cross-eye jamming using a dual-polarization array[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(3): 491–498. doi: [10.21629/JSEE.2018.03.06](https://doi.org/10.21629/JSEE.2018.03.06).
- [119] 白渭雄, 唐宏, 陶建峰. 拖曳式诱饵对单脉冲雷达的干扰分析[J]. 电子信息对抗技术, 2007, 22(6): 39–42. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2007.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2007.06.010).
BAI Weixiong, TANG Hong, and TAO Jianfeng. Analysis of towed decoy jamming on monopulse radar[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2007, 22(6): 39–42. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2007.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2007.06.010).
- [120] 廖云, 何松华, 张军. 脉冲多普勒雷达抗拖曳式干扰方法研究[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(5): 325–328. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.05.001).
LIAO Yun, HE Songhua, and ZHANG Jun. Method research on mono-pulse Doppler radar countering towed decoy jamming[J]. *Radar Science and Technology*, 2009, 7(5): 325–328. doi: [10.3969/j.issn.1672-2337.2009.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-2337.2009.05.001).
- [121] YANG Yong, FENG Dejun, ZHANG Wenming, *et al*. Detection of chaff centroid jamming aided by GPS/INS[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(2): 130–142. doi: [10.1049/iet-rsn.2012.0101](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2012.0101).
- [122] 徐娟, 姚如贵, 陈赓, 等. 频域空时域级联导航抗干扰技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(2): 137–141. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2015.02.035](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2015.02.035).
XU Juan, YAO Rugui, CHEN Yun, *et al*. Cascaded frequency and spatial-time domain anti-jamming technique in navigation systems[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2015, 35(2): 137–141. doi: [10.15892/j.cnki.djzdx.2015.02.035](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2015.02.035).
- [123] WANG LUO Shengbin, XU Zhenhai, LIU Xinghua, *et al*. Subarray-based frequency diverse array for target range-angle localization with monopulse processing[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(14): 5937–5947. doi: [10.1109/JSEN.2018.2844280](https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2844280).
- [124] 龙杰. 单脉冲前斜SAR成像信息处理技术研究[D]. [博士学位论文], 北京理工大学, 2014.
LONG Jie. Research on monopulse squint SAR imaging information processing technique[D]. [Ph.D. dissertation], Beijing Institute of Technology, 2014.

作者简介



马佳智(1987-), 男, 山西大同人, 博士, 讲师。2017年在国防科技大学电子科学学院获得博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向为极化信息处理、精确制导技术。

E-mail: jzmanudt@163.com



施龙飞(1978-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 副研究员。2007年在国防科技大学电子科学学院获得博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院副研究员, 主要研究方向为雷达信号处理、雷达对抗技术。

E-mail: longfei_shi@sina.com



徐振海(1977-), 男, 河南卫辉人, 博士, 教授。2004年在国防科学技术大学电子科学与工程学院获得博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院教授, 主要研究方向为阵列信号处理、子阵划分技术、目标分辨技术。

E-mail: xzh930@aliyun.com



王雪松(1972-), 男, 内蒙古包头人, 博士, 教授。1999年在国防科学技术大学电子科学与工程学院获得博士学位, 现担任国防科技大学电子科学学院教授, 院长, 主要研究方向为极化信息处理、雷达目标识别、新体制雷达技术。

E-mail: wangxuesong@nudt.edu.cn