

机载雷达告警接收机发展现状及趋势

王 星^① 王俊迪^{*①} 金政芝^② 周一鹏^③ 陈 游^①

^①(空军工程大学航空工程学院 西安 710038)

^②(93128部队 北京 100843)

^③(空军航空大学 长春 130022)

摘要: 随着信息技术的发展和空战模式的改变, 机载雷达告警接收机(RWR)成为现代战机不可缺少的电子战系统。为了更好地理解机载RWR, 该文从接收机体制角度考虑, 将机载RWR的系统架构划分成两个阶段, 对每个阶段的特点和组成进行了分析。接着详细阐述了机载RWR的信号处理流程, 并且梳理了与信号分选、信号识别和威胁评估相关的技术。最后, 从实际运用出发, 系统总结了机载RWR在复杂电磁环境中应对新体制雷达中面临的挑战以及未来的发展需求。

关键词: 机载雷达告警接收机; 系统架构; 信号处理流程; 分选识别; 威胁评估; 发展需求

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)02-0376-13

DOI: 10.12000/JR22200

引用格式: 王星, 王俊迪, 金政芝, 等. 机载雷达告警接收机发展现状及趋势[J]. 雷达学报, 2023, 12(2): 376-388. doi: 10.12000/JR22200.

Reference format: WANG Xing, WANG Jundi, JIN Zhengzhi, *et al.* Current situation and development demands of RWR system[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(2): 376-388. doi: 10.12000/JR22200.

Current Situation and Development Demands for a Radar Warning Receiver System

WANG Xing^① WANG Jundi^{*①} JIN Zhengzhi^② ZHOU Yipeng^③ CHEN You^①

^①(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

^②(Unit 93128, Beijing 100843, China)

^③(Aviation University Air Force Aviation University Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: With the development in information technology and the change of air combat mode, Radar Warning Receiver (RWR) have become indispensable electronic warfare equipment for modern fighters. To better understand the airborne RWR system, this study divides the airborne RWR architecture into two stages from the perspective of receiver system. The characteristics and components of the architecture are analyzed. Then, this study elaborates on the signal processing flow of airborne RWR, and classifies the technologies and algorithms related to signal sorting, signal identification and threat assessment. Finally, this study systematically summarizes the challenges and future demand analysis of airborne RWR in complex battlefield environments and in dealing with new radar systems.

Key words: Radar Warning Receiver (RWR); System architecture; Signal processing flow; Sorting and identification; Threat assessment; Development demands

收稿日期: 2022-09-30; 改回日期: 2022-12-02; 网络出版: 2022-12-11

*通信作者: 王俊迪 qxwangjundi@sina.com

*Corresponding Author: WANG Jundi, qxwangjundi@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(62001489), 陕西省自然科学基金(2021JM-225)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62001489), Shaanxi Natural Science Foundation (2021JM-225)

责任编辑: 董春曦 Corresponding Editor: DONG Chunxi

1 引言

机载雷达告警接收机(Radar Warning Receiver, RWR)是作战飞机用于雷达辐射源感知和威胁告警的电子对抗侦察系统^[1,2]。它通过截获和分析照射到载机上的雷达信号,向飞行员提供雷达辐射源目标的方位、类型、威胁等级等信息,帮助飞行员掌握实时态势,提示飞行员采取恰当的电子对抗和战术规避等措施。它还可以引导干扰系统和反辐射导弹对高威胁目标实施干扰和打击,提高载机生存能力^[3]。机载RWR针对的目标主要包括预警雷达、目指雷达、制导雷达、火控雷达、主动雷达导引头等^[4],其处理的主要雷达信号特征包括到达时间(Time of Arrival, TOA)、到达角(Direction of Arrival, DOA)、脉冲载频(Radio Frequency, RF)、脉冲宽度(Pulse Width, PW)、脉冲重复间隔(Pulse Repetition Interval, PRI)、脉冲幅度(Pulse Amplitude, PA)、信号调制样式等。近年来,经常随RWR一起出现的电子支援措施(Electronic Support Measures, ESM)来源于美军电子战定义中的电子支援(Electronic Support, ES),与中国“电子对抗”标准中的“电子对抗侦察”对应,威胁告警是其下的一种功能,雷达告警器(RWR)是针对特定系统功能出现的名词。三代机之前的RWR功能相对简单,主要是对照射到飞机上的特定频率雷达信号发出警告,并且指示威胁的大致方向,以上功能成为普遍认可的机载RWR基本功能。随着需求和能力的发展,RWR逐渐具有了传统意义上认为是ESM的功能,包括精确测向、无源定位能力、数据存储能力和更复杂的信号分析能力。这些能力可以增加告警威胁判断准确性,还可以延伸用于引导攻击,可以认为是告警能力的扩展;同时,实现这些功能的系统组成也是相互关联。因此,本文作者认为,在机载自卫电子对抗系统的划分上不应该区分出ESM功能和RWR功能,应统一称为RWR。

目前,机载RWR已经向数字化、模块化和认知化方向发展^[5,6]。为了更好地总结机载RWR发展脉络,了解机载RWR信号处理相关技术,为未来机载RWR发展提供启示和建议。本文介绍了机载RWR的系统架构,详细分析了信号截获和参数测量、信号预处理、信号分选、信号识别、威胁评估5个机载RWR信号处理流程。从现代电磁环境的复杂性和雷达技术的发展出发,系统总结了目前机载RWR面临的挑战。从实际运用出发,指出对于机载RWR的单独综合射频孔径需求、基于系统最优的高性能指标需求、分级智能化需求、系统模块化需求、数据融合处理的需求和威胁评估简化的需求。

2 机载RWR系统架构和信号处理流程发展现状

2.1 机载RWR系统架构发展历程

机载RWR的发展始于20世纪40年代,越南战争后成为飞机的标准设备。从接收机体制角度来看,机载RWR发展经历了两个阶段:模拟接收体制时代和数字体制时代。

2.1.1 模拟接收体制

早期的机载RWR接收机为模拟体制的宽带视频晶体接收机,基本的组成包括天线、接收机、信号处理部分和终端部分^[7],如图1所示。主要的特点是结构简单、截获概率高,但是低频率的分辨率低。模拟体制机载RWR系统采用顺序式处理系统架构,即雷达信号被天线截获后传输到接收机,接收机直接对雷达信号进行测量和处理,产生包含雷达信号重要参数的脉冲描述字。

模拟体制机载RWR的天线主要分为接收天线和专项天线。接收天线阵用来截获雷达信号,并与接收模块、分析处理单元测量和计算出雷达平台的方位、俯仰信息。为了保证信号截获的方向有效性和极化对准,机载RWR的接收天线大部分使用的是喇叭天线、平面螺旋天线和多波束天线。专项天线是面向一些特殊信号(红外、激光)而设置的告警天线^[8],这些信号往往是威胁级别很高的信号,能够直接反映对方的火控信息。但由于技术原因,接收天线无法截获这些信号,因此设立红外/激光专项天线。红外/激光信号被专项天线截获后,经过接收模块中的专门电路进行放大和变换并且产生数据码,而后产生的数据码被送给分析处理单元^[9]。在后期的发展中,为了提高天线的测向精度,干涉仪系统被增加到机载RWR,其天线主要是用平面螺旋天线组合成的天线阵列。

早期RWR接收机带宽较窄,针对目标单一,不需要精确测频,所获取的信息基本可以满足告警要求。但是,随着接收机带宽越来越宽,目标雷达参数重合情况增多,利用载频信息分选和识别目标有了关键意义,因此对于测频的需求提高。为了提高测频精度,一种方法是在晶体视频接收机前端增加可调谐窄带带通滤波器,按照信号时序顺序接收,增强了对于频率的选择性,此类接收机称为可调谐射频接收机;另一种方法是在前端放置多个窄带带通滤波器,使用多个滤波器同时接收信号,此类接收机称为多信道接收机。由于晶体视频接收机信号处理能力较弱,接收机灵敏度低,逐步改为超

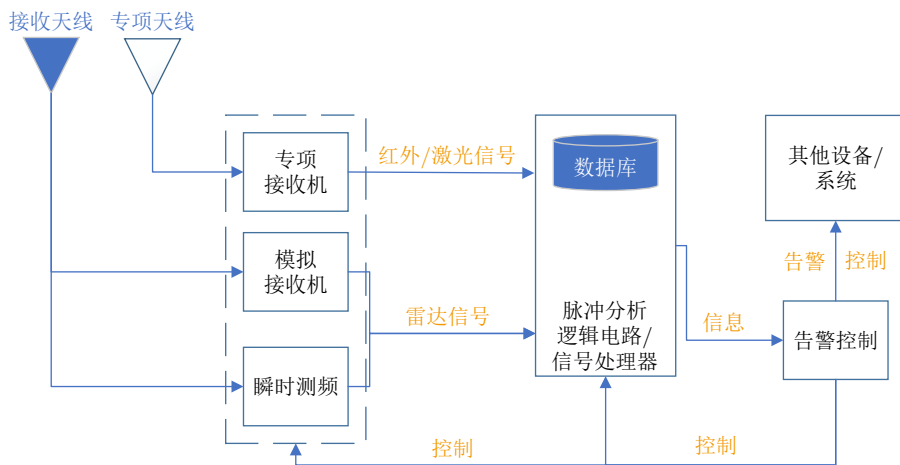


图1 模拟体制机载RWR基本架构图

Fig. 1 Basic architecture of analog airborne RWR

外差接收机。早期典型的模拟体制机载RWR有AN/APR-25, AN/APR-26等。

随后, 瞬时测频接收机广泛应用, 其在瞬时带宽、频率测量精度、体积重量和成本等方面具有很大的优势。在实际运用中, 常常将瞬时测频接收机和晶体视频接收机或者超外差式接收机配合使用。晶体视频接收机或者超外差式接收机测量脉冲幅度、脉冲起始时间和终止时间等参数, 瞬时测频接收机测量每个脉冲的频率参数。瞬时测频接收机主要以数字化方式完成信号处理, 此后, 机载RWR逐渐由模拟体制向数字体制过渡。

早期的信号数据处理部分主要依靠硬件逻辑电路, 输入信号与数据库信号进行匹配对比, 完成信号的识别告警功能。随着对信号处理能力需求的增加, 可编程微处理器逐渐应用在信号处理部分, 可以在硬件不修改的前提下, 通过软件修改实现对不同频率、不同脉冲重复频率等各种雷达的告警, 典型的可编程机载RWR为AN/ALR-46。

2.1.2 数字接收体制

随着电子技术的发展和接收新体制雷达信号的需求提升, 前端接收数字化采样技术被广泛应用, 标志着机载RWR进入全数字化时代, 世界上第1部全数字机载RWR为AN/ALR-69A(V)^[10]。在此阶段, 机载电子一体化成为发展趋势, 机载RWR采用基于机载总线的系统架构, 如图2所示。在射频截获部分采用机载射频孔径系统, 信号的模拟处理模块前移, 后端完全采用并行数字信号处理的方式实现, 设备的各种部件通过高速的光纤总线/网络互连在一起。机载RWR设备内的单元可以分为两大类, 一大类为数据采集和编码, 主要功能为雷达信号的截获、测量和编码, 包括前端接收单

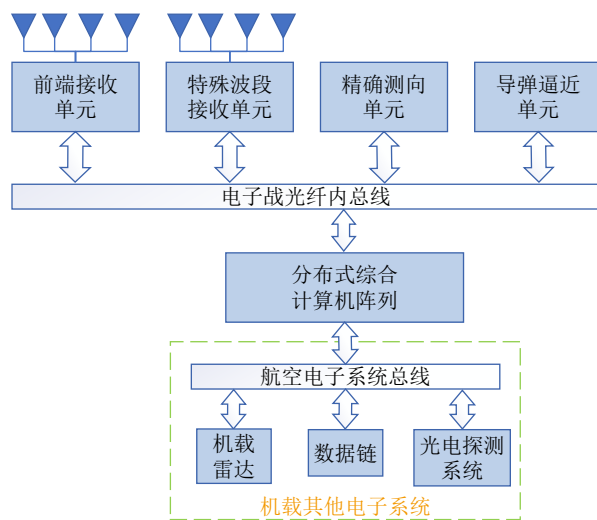


图2 数据总线机载RWR系统架构

Fig. 2 Architecture of airborne RWR system based on data bus

元、特殊波段接收单元、精确测向单元和基于紫外/红外的导弹逼近告警单元; 另一大类为计算单元, 主要是采用并行处理方式的分布式综合计算机阵列, 主要功能为处理各种经过编码的射频信号和光电信号。整个机载RWR设备通过航空电子系统总线/网络和其他设备互连, 以充分利用机上各种传感器资源如相控阵雷达、数据链、光电雷达等所得的信息, 提高辐射源威胁识别和评估的可信度。

相比于顺序式机载RWR系统架构, 基于机载总线的机载RWR系统架构主要的特点是信号数据依靠数据总线传输和信号处理实现了软件化。各传感器截获信号后, 通过数模转换器完成数字化处理。数字化信号根据信号处理技术的不同分别提取不同的特征参数, 特征参数数据依靠数据总线传输到综合处理器, 综合处理器依靠嵌入式软件对信号进行处理并产生告警信息, 告警信息和引导控制指

令通过数据总线分别传输到前舱显示器和其他辐射单元。有的机载RWR系统还可以融合机载雷达、敌我识别器和数据链的信息辅助完成威胁告警。

目前, 机载天线技术也得到了很大的发展, 截获的频率范围扩展到2~40 GHz。相比于模拟体制的架构, 数字化接收体制的机载RWR天线大多数采用4个宽带螺旋天线提供360°方位覆盖, 4个数字化4象限接收机完成信号采集。前端接收机需要完成限幅预增大、覆盖频带划分、视频信号提取、扩展接收机动态范围4个功能, 形成多频段、多通道的雷达视频信号和射频信号, 便于后续部件处理^[1]。较为先进的机载RWR设备实现了共型天线技术, 例如F-22飞机中的AN/ALR-94告警器, 它将30多部先进天线平滑地嵌入机翼和机身中, 实现全方位、全频段的信号截获, 并且具有先进的精确定位与识别系统(Precision Location and Identification, PLAID), 可以采用单阵元测多普勒频率、双阵元构成干涉仪测相位差变化率及时延测向对地面固定辐射源进行粗定位及精定位。

2.2 机载RWR信号处理流程

机载RWR系统的总体信号处理流程如图3所示。主要分为5个过程, 分别是信号截获和参数测量、信号预处理、信号分选、信号识别和威胁评估, 最后将告警信息告知飞行员并引导干扰设备^[12]。

2.2.1 雷达信号截获和参数测量

电磁环境中所有类型的交叠信号被天线截获后进入前端接收机, 前端接收机通过瞬时测频和瞬时测向设备完成信号RF, TOA, PW, PA, DOA等基本参数的测量。目前, 部分先进的接收机还具备对脉内调制类型和信号指纹特征等特殊参数提取的功能。前端接收机完成参数测量后, 按照到达时间将接收的信号形成雷达脉冲特征参数数据列表, 数据列表记录了每一段雷达信号的详细特征, 而后将数据列表传输到后端处理器。

2.2.2 信号预处理

后端处理器接收到的初始数据列表包含了天线可截获范围内所有外部电磁环境的电磁信号, 具有脉冲交叠严重和脉冲数据密度大的特点。对于初始数据列表, 后端处理器直接处理难度较大, 因此需要对初始数据进行预处理。信号预处理环节主要进行信号稀释和已知/未知信号快速匹配关联^[13], 如图4所示。信号稀释通常根据雷达信号工作频段进行信号频域划分和根据雷达信号到达角进行空域划分, 同时将大量民用通信信号、二次雷达识别信号和己方辐射源等不感兴趣信号删除。

经过脉冲稀释的脉冲流信号再与已知信号数据库进行匹配对比, 从而分离出已知信号子脉冲流和

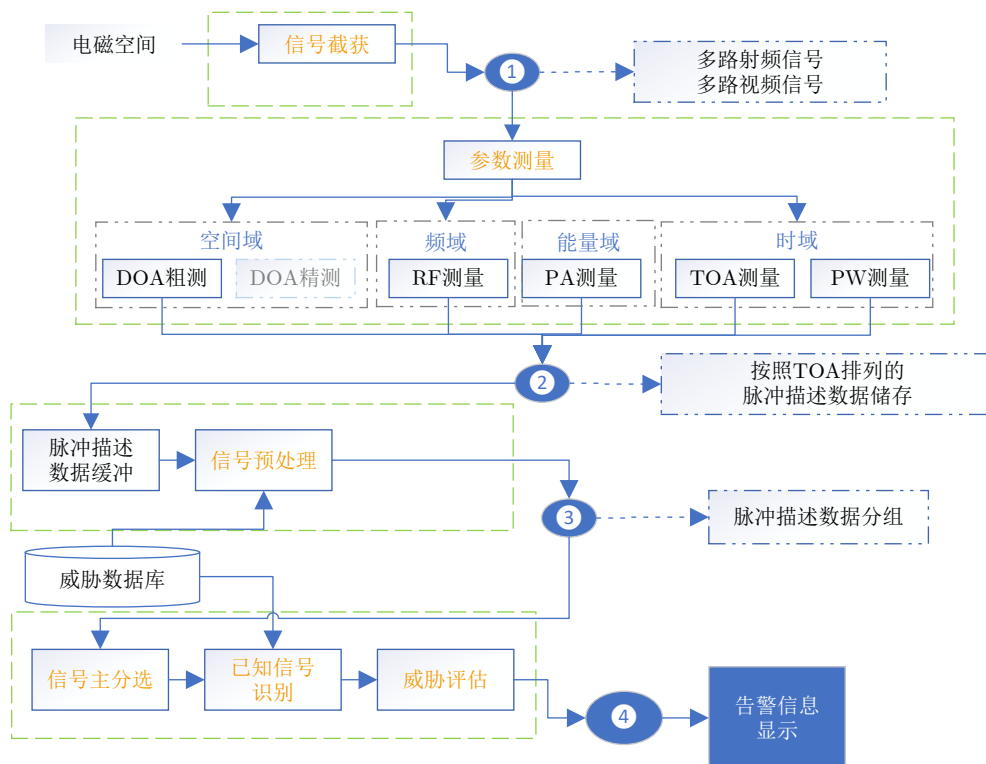


图3 机载RWR信号处理流程

Fig. 3 Airborne RWR signal processing flow

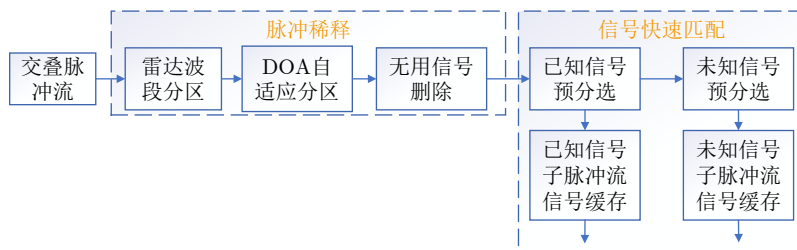


图4 脉冲稀释处理流程

Fig. 4 Pulse dilution processing flow

未知信号子脉冲流并且存储到缓存器中，以便后续信号分选的读取^[14]。在预处理中，通常选择TOA, RF, PW作为对比的特征参数。信号预处理的过程也可以看出对于前端接收的脉冲数据流分成无用信号、已知信号和未知信号的过程，达到减少后续信号处理的负担。

在系统中，实现数据预处理算法的软硬件电路和系统称为预处理机^[15]。传统的预处理机通常由锁存器、比较器、存储器和逻辑电路组成，随着数字技术的发展，采用并行DSP阵列构成预处理器和采用FPGA电路构成的预处理器被广泛应用。

2.2.3 信号分选

信号分选是对感兴趣的雷达信号进一步精确分类，将雷达信号按照不同类型不同平台进行归类，最终将交叠的雷达信号分成一个个同类型同平台的信号列表。早期的分选主要采用的信号参数为PRI。由于早期的雷达信号在同一相参处理周期内脉冲的PRI保持不变，因此可以通过对比PRI值，将相同数值的脉冲序列归为一类。典型的方法包括直方图算法^[16,17]、PRI变换法^[18,19]。随着雷达技术的进步，PRI的调制方式也更加多样，从单一重复调制逐渐变为滑变、抖动、参差等调制样式。调制样式的多变导致基于单参数PRI的分选效果显著下降，一些学者考虑将单独依靠PRI参数特征扩展成多个参数特征进行分选。多参数分选主要分为关联比较分选^[20]和多参数联合聚类分选。多参数关联比较法又称小盒分选，主要是根据DOA, PW, RF等参数对威胁数据库记录的辐射源数据进行关联。多参数联合聚类分选法是利用聚类算法对雷达信号进行无监督分组，主要包括基于划分聚类的分选方法^[21]、基于层次聚类的分选方法^[22]、基于网格聚类的分选方法^[23]、基于密度聚类的分选方法^[24,25]、基于模糊聚类的分选方法^[26,27]等。随着机器学习技术的快速发展，越来越多的学者也开始探究其相关技术在雷达信号分选中的应用。基于机器学习算法的雷达信号分选主要将大量的带有标签的辐射源数据列表作

为训练集输入到智能网络中，智能网络通过对已知数据的估计或近似建立适应性网络。机器学习算法强大的学习能力和数据处理能力，能够同时完成信号分选和识别功能，因此基于机器学习算法的雷达信号分选即识别，两者的应用算法具有相似性。为了减少赘述，相关算法在2.4节介绍。

随着新体制雷达工作模式不断拓展，信号样式和调制类型越来越复杂。不同雷达的基本特征参数交叠严重，难以区分，因此学者开始研究提取雷达信号脉内瞬时特征^[28]、统计特征向量^[29]、高阶频谱^[30]、多重分形谱^[31]、双谱对角切片^[32]等其他特征。这些研究从不同维度挖掘信号脉内信息，拓展了雷达信号特征体系，为信号分选提供丰富的特征输入。

相比情报侦察(Electronic Intelligence, ELINT)系统，机载RWR信号分选要求很高的实时性、准确性、自动性。因此在保证高准确率的同时提升算法的运算速度以及智能性是今后研究的重点。

2.2.4 信号识别

经过前期的分选处理，交叠的雷达脉冲信号被分离成一个个单部雷达辐射源的特征参数。目标识别的环节是根据辐射源的特征参数判断平台类型，传统机载RWR的目标识别采用预识别、主识别以及相关识别3级处理结构，基本的目标处理流程如图5所示。

早期的雷达辐射源识别方法有参数匹配法、专家系统等。参数匹配法又称模板匹配法，是利用信号特征参数与已知的威胁数据库进行匹配，识别雷达辐射源的属性信息^[33]。该方法具有识别速度快、易于实现等优点，但过于依赖先验知识，缺乏推理能力。专家系统法根据专家提供的雷达属性知识，构建雷达信号识别的推理规则，对雷达辐射源数据进行推理和识别，具有一定的学习和推理能力^[34]，但实现依赖于海量的雷达信号参数实例及雷达属性知识。该方法的识别效率较低，识别速度较慢。

近年来，机器学习算法在识别的优势促使越来越

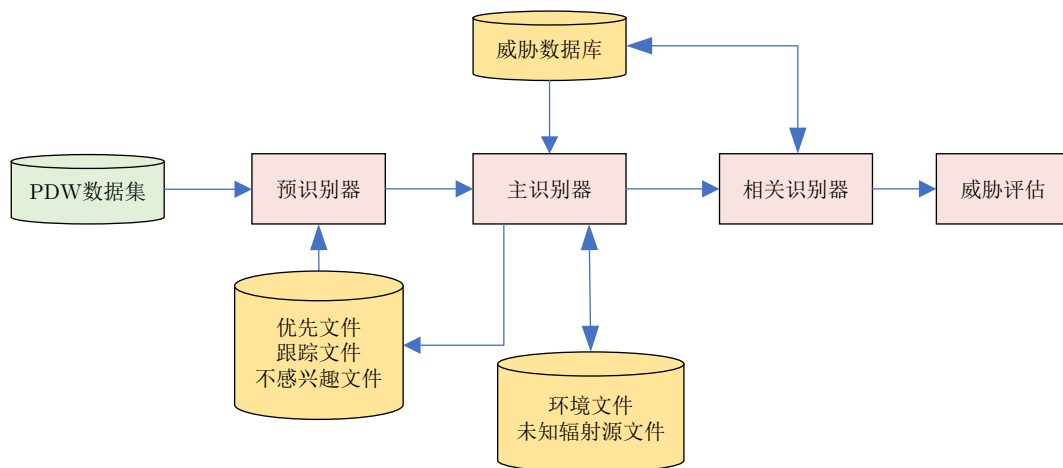


图5 目标识别处理流程

Fig. 5 Target recognition processing flow

越多的研究人员将最新的机器学习成果应用到雷达辐射源识别的研究中^[35]。目前广泛应用到雷达辐射源识别的机器算法有神经网络(Neural Network)^[36]、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)^[29]。随着深度学习算法的发展,卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)^[37,38]、循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)^[39]、域对抗神经网络^[40]、深度置信网络(Deep Belief Network, DBN)^[41]、栈式降噪自编码器(stack Denoise Auto-Encoder, sDAE)^[42]、长短期记忆网络(Long Short Term Memory, LSTM)^[43]等算法在雷达识别领域得到广泛的研究。此外,极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM)^[44]、集成学习(weighted-xgboost)^[45]、AdaBoost^[46]、随机森林^[47]、强化学习^[48,49]等算法也应用在雷达识别领域。

目前的机载RWR的雷达信号识别主要任务为平台类型识别,并不能准确地判别雷达工作模式。在日益激烈的电子对抗中,双方的攻守之势从以前仅依靠空中态势转变为同时依靠机载电子设备发射的电磁信号信息和空中态势信息。能够准确掌握对方雷达的工作模式成为自身威胁评估的重要前提。目前,雷达工作模式识别主要有基于模型和基于参数的两大类识别方法。基于模型的工作模式识别是通过对雷达系统进行建模实现雷达工作模式的识别和预测,建立模型的方法主要有隐马尔可夫模型^[50]、句法模型^[51]、预测状态表示模型^[52]、生物工程模型^[53]等。如果具有完备的先验知识,基于模型的工作模式识别能够将雷达工作模式完备地表现出来,甚至可以预测雷达工作模式。基于参数的雷达工作模式识别主要通过提取雷达信号特征参数,利用深度学习进行。

在电磁环境日益复杂和雷达技术不断发展的情

况下,对雷达识别技术的要求不断增加。对机载RWR的雷达识别的准确性和智能性方面的要求不断增加,同时也增加了对已知信号的快速识别和未知信号准确推理的需求。

2.2.5 威胁评估

机载RWR最主要的目的就是进行威胁评估,实现对全域的威胁感知,这是区别于ELINT最大的特征。前期信号预处理、信号分选和信号识别等环节都是为这一最终目的提供支持。机载RWR根据态势信息和辐射源信息计算威胁程度,最终的结果传输到座舱的屏显画面。同时,根据设定的程序引导有源干扰或者无源干扰,使其按照设定的干扰样式和干扰(投放)方案进行自主对抗。目前,由于雷达工作模式识别不确定性高,并且对于飞行员来说主要关心的是雷达的工作状态(跟踪状态、制导状态)、平台类型和敌方导弹杀伤边界,因此,在屏显画面上只对跟踪或者制导信号的平台进行特殊标记。当机载RWR检测到有来袭导弹时,不仅在屏幕显示器上进行特殊标记,还会以语音的形式进行提醒。

学者对于威胁评估算法开展了广泛研究,主要的方法包括多属性决策理论^[54]、直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Sets, IFS)^[55]、贝叶斯网络^[56](Bayesian Network, BN)、多目标排序^[57]、机器学习^[58,59]、云模型^[60]、雷达图法^[61]等方法。多属性决策理论应用得较为广泛,灰主成分^[62]、线性回归分析^[63]、动态变权^[64]、粗糙集^[65,66]等方法被用于改进多属性决策的性能。随着电磁环境中电磁脉冲密度急剧增加以及新体制雷达的广泛应用,对信号分选识别和辐射源测向带来了极大挑战,单单依靠信号信息无法快速准确进行威胁评估。针对以上问题,

作者所在的团队^[67-70]提出了将自身雷达探测信息和告警器截获的辐射源信息相融合的威胁评估思想。

3 机载RWR发展趋势

3.1 机载RWR面临的挑战

现今,作战飞机面临的辐射源种类和数量急剧增加,雷达信号在空、时、频域交叠日益严重,这些对机载RWR带来极大的处理压力和处理难度。同时作为对抗的主要目标——雷达,其技术高速发展:接收和发射体制实现全方面数字化处理、低截获技术和相控阵广泛应用、波束捷变能力大幅度增强、信号参数变化能力增强^[71]、雷达软件化趋势明显^[72,73]。电磁环境的变化和雷达技术的发展都对机载RWR提出了新的挑战。

(1) 日益复杂的电磁环境对雷达信号分选识别的准确度提出了更高要求。新体制雷达参数的复杂多变造成了分选时的“增批”现象严重,有时将单个辐射源判别成多个辐射源,给飞行员的判断造成了极大的困扰。同时,雷达种类的增多和雷达工作频率区间的重复使用,造成了雷达识别经常混淆的问题,尤其对于机载雷达,工作波段集中在X波段区间附近,PW和PRI等工作参数也存在交叠现象。

(2) 日益复杂的电磁环境对数据接收和处理能力提出了更高要求。电磁环境中各种辐射源类型的增多和数量的增加,使电磁环境密度急剧增加。有相关研究表明,现代电磁环境中的脉冲密度超过100万脉冲/s,甚至可达到500万脉冲/s。前端接收模块在面对如此大的电磁环境密度时,经常会出现接收机饱和的现象,堵塞了接收机的截获通道,导致漏警情况的发生。后端处理模块面对如此大的电磁环境密度时处理能力不足,导致部分雷达脉冲由于处理不及时而被抛弃的情况发生。

(3) 先进体制雷达技术的发展对雷达工作状态的有效判断提出了更高要求。对于早期的机械扫描雷达,机载RWR根据幅度、波束停留时间、频率等信息可以精确判断对方雷达是否进入跟踪或者制导状态。随着采用相位扫描体制雷达的广泛应用,雷达的搜索状态和跟踪状态的参数界限逐渐模糊,使机载RWR不能及时准确地判断对方雷达是否进入跟踪或者制导状态,造成了威胁评估极大的不确定性。

(4) 先进体制雷达技术的发展对未知目标的识别和未知威胁的推理提出了更高要求。由于国家安全的需要,各国严格把控各国的辐射源参数信息,辐射源参数的先验情报较少。而且,新体制雷达大

部分实现软件化,辐射波形和辐射参数可以通过快速编程实现变化,总会出现威胁数据库中没有的信号特征。现有的雷达识别技术依赖于先验威胁数据库,无法识别未知目标。威胁评估技术主要根据威胁目标的时域、空域和频域等现有信息进行评估,无法对未知的威胁进行推理。

3.2 机载RWR需求分析

随着信息技术的发展,现代战争的作战样式发生了改变,各种新型雷达也广泛应用,除了数字化和一体化的必然趋势,也给机载RWR带来了新的需求:

(1) 单独射频孔径的需求。为了提升飞机的隐身性能,射频综合孔径一体化成为发展趋势^[74]。但是,在使用中由于受到飞机自身资源的限制,接收天线需要和雷达、通信等设备分频分时使用,容易产生漏警现象。机载RWR作为与载机生存直接相关的特殊机载电子设备,在飞机进入到敌导弹发射射程内后,需要全时、全方位和重点频段接收信号。因此,本文认为需要提供机载RWR天线单独的射频孔径,尤其在关系飞机自身安全的重点频段,其他频段可以与其他系统采用综合孔径的方式。

(2) 基于系统最优的高性能指标需求。灵敏度、瞬时带宽覆盖范围、动态范围、频率分辨率和参数的精确度是机载RWR的重要性能指标。其指标的好坏直接影响机载RWR系统的性能。高的灵敏度可以使截获距离更远,但是同样也会对信号处理带来压力。宽的瞬时频率覆盖可以截获范围更广的各种频率的雷达信号,但是也会带来接收数据量增大的问题。因此,要根据机载RWR设计的目的和信号处理能力合理地规划机载RWR各项指标。使系统达到最优的各项性能指标是机载RWR的基础需求。

(3) 分级智能化的需求。随着认知电子战概念的突出,电子战设备更加注重智能化^[75]。但是,智能网络的更新训练过程较慢,对于电磁环境的变化需要一定时间的适应,满足不了实时性的要求。文献^[76]提出将机载RWR分为前级告警和后级告警两大模块,前级模块针对已知信号和简单信号进行快速告警,主要采用传统信号识别算法实现快速告警,后级模块针对前级未成功告警的数据进行准确告警,采用各种深度学习算法并结合其他数据源信息进行综合推理,完成精确告警,还可以对行动意图和未知威胁进行推理与告警,实现超前告警。前后级的信息可以相互使用,前级告警结果可以作为先验知识引导后级处理,加快后级处理的收敛速

度, 后级处理结果可以作为已知信息更新前级威胁数据库。

(4) 系统模块化的需求。对于电子设备而言, 有着著名的“摩尔定律”, 往往一种新型机载RWR研制成功时, 其内部部分元器件已经严重落后, 造成了设备的重复研制^[77]。为了降低设备的研发成本、简化设备的后期技术维护, 节约经费, 加快设备的更新换代速度, 需要实现机载RWR的模块化设计。模块化的设计就是在标准化的架构下, 通过各个功能模块的组建成弹性的机载RWR系统, 每个功能模块可以快速拆解更换和单独升级。模块化的机载RWR系统根据任务和对象的不同, 可以快速构建各种功能和性能指标的机载RWR系统。

(5) 数据融合处理的需求。着眼于体系化作战的需求, 机载航电系统更加趋于综合化和一体化, 机载RWR将成为综合航电系统的一部分^[78]。综合航电一体化的主要特点是各电子系统只进行数字化处理和信号处理, 数据的处理部分由中央综合处理器完成。各机载电子设备的数据可以共享和融合处理。机载RWR数据可以引导雷达和干扰设备的辐射, 实现精辐射源的精确控制, 甚至可以直接向武器系统提供目标位置信息。同时, 机载RWR可以融合雷达数据弥补机载RWR测距不准的缺陷, 提升定位速度和定位精度, 也可以利用敌我识别系统和数据链的目标属性信息, 实现对目标精准的威胁评估。

(6) 威胁评估简化的需求。目前的威胁评估主要通过处理分选识别后的平台信息、工作状态信息和信号脉冲描述字。雷达参数的复杂多变使依靠参数信息的识别准确度下降严重。对此, 减少对于参数信息依赖的威胁评估是目前的迫切需求。发展以雷达行为特征和载机行为特征作为依据的评估技术, 增强机载RWR对于雷达目标工作状态转换的敏感性和对雷达信号特征的分析能力。在威胁评估上从参数评估转化为行为评估, 简化威胁评估的过程和方法。

4 结语

本文从接收机体制角度来划分, 将机载RWR分为模拟接收体制和数字接收体制两个阶段, 分析了每个阶段的硬件技术和特点。同时, 本文详细梳理了机载RWR的信号截获和参数测量、信号预处理、信号分选、信号识别和威胁评估5个信号处理流程, 对每个处理流程的主要功能进行介绍, 同时在信号分选、信号识别和威胁评估部分系统阐述了相关技术与算法的发展。最后, 系统总结了现代电

磁环境的复杂性和雷达技术在机载RWR的雷达信号分选识别能力、数据接收和处理能力、雷达工作状态的有效判断能力、未知目标的识别和未知威胁的推理能力的挑战。同时指出在数字化和一体化必然趋势下对于机载RWR的单独综合射频孔径需求、基于系统最优的高性能指标需求、分级智能化需求、系统模块化需求、数据融合处理的需求和威胁评估简化的需求, 为机载RWR的发展提供启示和建议。

参 考 文 献

- [1] 李峥. 机载雷达告警技术发展趋势[J]. 电子信息对抗技术, 2008, 23(3): 51–54. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2008.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2008.03.013).
- LI Zheng. The development trend of the airborne radar warning receiver[J]. *Electronic Information Countermeasure Technology*, 2008, 23(3): 51–54. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2008.03.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2008.03.013).
- [2] 周帆, 陈兴凯, 韩壮志, 等. 机载雷达告警接收机的现状及技术发展趋势[J]. 飞航导弹, 2014(2): 41–46. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.2014.02.010](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.2014.02.010).
- ZHOU Fan, CHEN Xingkai, HAN Zhuangzhi, et al. The present situation and technical development trend of airborne radar warning receiver[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014(2): 41–46. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.2014.02.010](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.2014.02.010).
- [3] GRANT P M and COLLINS. Introduction to electronic warfare[J]. *Communications Radar & Signal Processing Iee Proceedings F*, 1982. doi: [10.1049/ip-f-1:19820020](https://doi.org/10.1049/ip-f-1:19820020).
- [4] 张璟琿, 黄新松, 吴志建. 机载自卫电子对抗装备作战目标分析[J]. 舰船电子对抗, 2012, 35(6): 10–13. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.06.012](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.06.012).
- ZHANG Jinghui, HUANG Xinsong, and WU Zhijian. Campaign targets analysis of airborne self-defense electronic countermeasure equipment[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2012, 35(6): 10–13. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.06.012](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2012.06.012).
- [5] 高松, 滕克难, 段哲. 美军核心电子战支援装备及其发展趋势分析[J]. 飞航导弹, 2019(11): 12–17. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.20190114](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20190114).
- GAO Song, TENG Kenan, and DUAN Zhe. Analysis on the core EW support equipment and its development trend of the US army[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(11): 12–17. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.20190114](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20190114).
- [6] 刘都群, 郭冠宇. 俄罗斯电子战领域发展现状与趋势分析[J]. 飞航导弹, 2019(10): 16–19. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.20190843](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20190843).
- LIU Duqun and GUO Guanyu. Analysis on the development status and trend of Russian electronic

- warfare[J]. *Aeronautical Missile*, 2019(10): 16–19. doi: [10.16338/j.issn.1009-1319.20190843](https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20190843).
- [7] ADAMY D L, 王燕, 朱松, 译. EW101: 电子战基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 42–65.
ADAMY D L, WANG Yan, and ZHU Song. translation. EW101: A First Course in Electronic Warfare[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 42–65.
- [8] MAINI A K. Battlefield lasers and opto-electronics systems[J]. *Defence Science Journal*, 2010, 60(2): 189–196. doi: [10.14429/dsj.60.339](https://doi.org/10.14429/dsj.60.339).
- [9] OSTROWSKI R, CYWIŃSKI A, and STRZELEC M. Electronic warfare in the optical band: Main features, examples and selected measurement data[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(5): 1636–1649. doi: [10.1016/j.dt.2020.09.007](https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.09.007).
- [10] 鲁旭. 机载雷达告警接收机的发展现状与发展前景展望[J]. 信息通信, 2020(5): 64–65.
LU Xu. Development status and prospect of airborne radar warning receiver[J]. *Information & Communications*, 2020(5): 64–65.
- [11] 邵超. 雷达发射机和接收机设计[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2012.
SHAO Chao. Design of radar transmitter and radar receiver[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2012.
- [12] ADAMY D L, 朱松, 王燕, 译. EW102: 电子战进阶[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 6–29.
ADAM D L, ZHU Song, and WANG Yan. translation. EW102: A Second Course in Electronic Warfare[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 6–29.
- [13] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 95–100.
ZHAO Guoqing. Principle of Radar Countermeasure[M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 95–100.
- [14] 陈杨, 陈新年, 颜振亚, 等. 一种综合雷达信号侦察预处理方法[J]. 现代雷达, 2016, 38(4): 78–81. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.018](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.018).
CHEN Yang, CHEN Xinnian, YAN Zhenya, *et al.* A method of integrated radar signal reconnaissance pretreatment[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(4): 78–81. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.018](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.04.018).
- [15] 张永顺, 童宁宁, 赵国庆. 雷达电子战原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 73–78.
ZHANG Yongshun, TONG Ningning, and ZHAO Guoqing. Principles of Radar Electronic Warfare[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 73–78.
- [16] MARDIA H K. New techniques for the deinterleaving of repetitive sequences[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1989, 136(4): 149–154. doi: [10.1049/ip-f-2.1989.0025](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1989.0025).
- [17] MILOJEVIĆ D J and POPOVIĆ B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses[J]. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, 1992, 139(1): 98–104. doi: [10.1049/ip-f-2.1992.0012](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0012).
- [18] NISHIGUCHI K and KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(2): 407–421. doi: [10.1109/7.845217](https://doi.org/10.1109/7.845217).
- [19] 樊甫华, 史英春, 秦立龙. 一种脉冲重复间隔固定序列快速检测方法[J]. 电子与信息学报, in press, 2022. doi: [10.11999/JEIT220127](https://doi.org/10.11999/JEIT220127).
FAN Fuhua, SHI Yingchun, and QIN Lilong. A method for fast detecting sequence with stable pulse repetition interval[J]. *Journal of Electronics & Information*, in press, 2022. doi: [10.11999/JEIT220127](https://doi.org/10.11999/JEIT220127).
- [20] CHANDRA V and BAJPAI R C. ESM data processing parametric deinterleaving approach[C]. TENCON'92 - Technology Enabling Tomorrow, Melbourne, Australia, 1992. doi: [10.1109/TENCON.1992.271990](https://doi.org/10.1109/TENCON.1992.271990).
- [21] 翁永祥, 赵万磊, 郑志娟. 基于PCA联合K-Means聚类的雷达信号分选算法[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(2): 38–42, 60. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.02.009](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.02.009).
WENG Yongxiang, ZHAO Wanlei, and ZHENG Zhijuan. Radar signal sorting algorithm based on PCA combined K-Means clustering[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2020, 43(2): 38–42, 60. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.02.009](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2020.02.009).
- [22] 何佩佩. 被动探测信号聚类分选算法研究[D]. [硕士论文], 中国舰船研究院, 2016.
HE Peipei. Research of passive detection signal sorting based on clustering algorithm[D]. [Master dissertation], China Ship Research and Development Academy, 2016.
- [23] 董柏娴, 汤建龙. 基于网格密度聚类的雷达信号在线分选算法[J]. 航天电子对抗, 2014, 30(6): 45–48. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2014.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2014.06.013).
DONG Baixian and TANG Jianlong. A radar signal online sorting algorithm based on grid-density clustering[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2014, 30(6): 45–48. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2014.06.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2014.06.013).
- [24] 刘鲁涛, 王璐璐, 李品, 等. DSets-DBSCAN无参数聚类的雷达信号分选算法[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(4): 158–163. doi: [10.11887/j.cn.202204017](https://doi.org/10.11887/j.cn.202204017).
LIU Lutao, WANG Lulu, LI Pin, *et al.* Radar signal sorting algorithm for DSets-DBSCAN without parameter clustering[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2022, 44(4): 158–163. doi: [10.11887/j.cn.202204017](https://doi.org/10.11887/j.cn.202204017).
- [25] 王星, 陈相, 周一鹏, 等. 一种基于改进DBSCAN的雷达信号分选算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(3):

- 47–54. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.008).
- WANG Xing, CHEN Xiang, ZHOU Yipeng, *et al.* A radar signal sorting algorithm based on improved DBSCAN algorithm[J]. *Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2021, 22(3): 47–54. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.008).
- [26] 李强. 雷达辐射源信号分选技术研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2019.
- LI Qiang. Research on radar emitter signal sorting technology[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2019.
- [27] 王嘉慰. 多参数聚类雷达信号分选技术研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2019.
- WANG Jiawei. Research on radar signal sorting technology of multi-parameter clustering[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2019.
- [28] IATSENKO D, MCCLINTOCK P V E, and STEFANOVSKA A. Extraction of instantaneous frequencies from ridges in time-frequency representations of signals[J]. *Signal Processing*, 2016, 125: 290–303. doi: [10.1016/j.sigpro.2016.01.024](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2016.01.024).
- [29] BUFLER T D and NARAYANAN R M. Radar classification of indoor targets using support vector machines[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(8): 1468–1476. doi: [10.1049/iet-rsn.2015.0580](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0580).
- [30] CAO Ru, CAO Jiuwen, MEI Jianping, *et al.* Radar emitter identification with bispectrum and hierarchical extreme learning machine[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(20): 28953–28970. doi: [10.1007/s11042-018-6134-y](https://doi.org/10.1007/s11042-018-6134-y).
- [31] 王星, 符颖, 陈游, 等. 基于多重分形和半监督EM的LPI雷达信号识别[J]. *控制与决策*, 2018, 33(11): 1941–1949. doi: [10.13195/j.kzyjc.2017.0799](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0799).
- WANG Xing, FU Ying, CHEN You, *et al.* Radar signal recognition based on multi-fractal and semi-supervised EM algorithm[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(11): 1941–1949. doi: [10.13195/j.kzyjc.2017.0799](https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0799).
- [32] 王星, 吕鹏程, 田元荣, 等. 基于BDS-GD的低截获概率雷达信号识别[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(3): 583–592. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146).
- WANG Xing, GUO Pengcheng, TIAN Yuanrong, *et al.* LPI radar signal recognition based on BDS-GD[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(3): 583–592. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0146).
- [33] DUDCZYK J and KAWALEC A. Identification of emitter sources in the aspect of their fractal features[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 2013, 61(3): 623–628. doi: [10.2478/bpasts-2013-0065](https://doi.org/10.2478/bpasts-2013-0065).
- [34] 李东海. 基于专家系统的雷达识别方法[J]. *舰船电子对抗*, 2014, 37(5): 10–13, 58. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2014.05.012](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2014.05.012).
- LI Donghai. Radar identification method based on expert system[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2014, 37(5): 10–13, 58. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2014.05.012](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2014.05.012).
- [35] BRONSTEIN M M, BRUNA J, LECUN Y, *et al.* Geometric deep learning: Going beyond Euclidean data[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2017, 34(4): 18–42. doi: [10.1109/MSP.2017.2693418](https://doi.org/10.1109/MSP.2017.2693418).
- [36] LIN C M, CHEN Y M, and HSUEH C S. A self-organizing interval type-2 fuzzy neural network for radar emitter identification[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2014, 16(1): 20–30.
- [37] ZHU Mingzhe, FENG Zhenpeng, and ZHOU Xianda. A novel data-driven specific emitter identification feature based on machine cognition[J]. *Electronics*, 2020, 9(8): 1308. doi: [10.3390/electronics9081308](https://doi.org/10.3390/electronics9081308).
- [38] XIAO Zhiling and YAN Zhenya. Radar emitter identification based on novel time-frequency spectrum and convolutional neural network[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(8): 2634–2638. doi: [10.1109/LCOMM.2021.3084043](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2021.3084043).
- [39] 陈森森. 基于RNN的雷达辐射源分类识别算法研究[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000535](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000535).
- CHEN Sensen. Research on classification and recognition algorithm of radar signal based on RNN[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000535](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000535).
- [40] HUANG Kejun, YANG Junan, LIU Hui, *et al.* Deep adversarial neural network for specific emitter identification under varying frequency[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences*, 2021, 69(2): e136737. doi: [10.24425/bpasts.2021.136737](https://doi.org/10.24425/bpasts.2021.136737).
- [41] 高翔. 基于深度置信网络的雷达辐射源识别[D]. [硕士论文], 西安电子科技大学, 2018.
- GAO Xiang. Radar emitter recognition based on depth confidence network[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2018.
- [42] 叶文强, 俞志富, 王虎帮, 等. 基于卷积神经网络辐射源信号识别算法[J]. *计算机仿真*, 2019, 36(9): 33–37. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2019.09.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2019.09.009).
- YE Wenqiang, YU Zhifu, WANG Hubang, *et al.* Recognition algorithm of emitter signals based on CNN[J]. *Computer Simulation*, 2019, 36(9): 33–37. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2019.09.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2019.09.009).
- [43] 王亮. 基于神经网络的雷达信号识别研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工程大学, 2021. doi: [10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000304](https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000304).
- WANG Liang. Research on radar signal recognition based

- on neural network[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2021. doi: [10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000304](https://doi.org/10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000304).
- [44] SUN Xia, XU Jingting, JIANG Changmeng, *et al.* Extreme learning machine for multi-label classification[J]. *Entropy*, 2016, 18(6): 225. doi: [10.3390/e18060225](https://doi.org/10.3390/e18060225).
- [45] CHEN Wenbin, FU Kun, ZUO Jiawei, *et al.* Radar emitter classification for large data set based on weighted-xgboost[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(8): 1203–1207. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0632](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0632).
- [46] 唐晓婧, 陈维高, 席龙飞, 等. 基于AdaBoost和决策树的雷达辐射源识别方法[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(4): 16–20, 58. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2018.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2018.04.004).
TANG Xiaojing, CHEN Weigao, XI Longfei, *et al.* The radar emitter identification algorithm based on Ada boost and decision tree[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(4): 16–20, 58. doi: [10.3969/j.issn.1674-2230.2018.04.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-2230.2018.04.004).
- [47] 刘艺林, 李胜勇, 李伟鹏, 等. 基于随机森林的雷达辐射源识别算法研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(2): 108–112. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2022.02.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2022.02.023).
LIU Yilin, LI Shengyong, LI Weipeng, *et al.* A radar emitter identification algorithm based on random forest[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, 29(2): 108–112. doi: [10.3969/j.issn.1671-637X.2022.02.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-637X.2022.02.023).
- [48] 苏畅. 基于强化学习的雷达辐射源识别技术研究与应用[D]. [硕士论文], 北京邮电大学, 2021. doi: [10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001199](https://doi.org/10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001199).
SU Chang. Research and application of radar emitter recognition technology based on reinforcement learning[D]. [Master dissertation], Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. doi: [10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001199](https://doi.org/10.26969/d.cnki.gbydu.2021.001199).
- [49] 冷鹏飞, 徐朝阳. 一种深度强化学习的雷达辐射源个体识别方法[J]. 兵工学报, 2018, 39(12): 2420–2426. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.12.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.12.016).
LENG Pengfei and XU Chaoyang. Specific emitter identification based on deep reinforcement learning[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(12): 2420–2426. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2018.12.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2018.12.016).
- [50] VISNEVSKI N, HAYKIN S, KRISHNAMURTHY V, *et al.* Hidden Markov models for radar pulse train analysis in electronic warfare[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Philadelphia, USA, 2005. doi: [10.1109/ICASSP.2005.1416374](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2005.1416374).
- [51] VISNEVSKI N, KRISHNAMURTHY V, WANG A, *et al.* Syntactic modeling and signal processing of multifunction radars: A stochastic context-free grammar approach[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(5): 1000–1025. doi: [10.1109/JPROC.2007.893252](https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.893252).
- [52] 欧健. 多功能雷达行为辨识与预测技术研究[D]. [博士论文], 国防科学技术大学, 2017. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000078](https://doi.org/10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000078).
OU Jian. Research on behavior recognition and prediction techniques against multi-function radar[D]. [Ph. D. dissertation], National University of Defense Technology, 2017. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000078](https://doi.org/10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.000078).
- [53] 马爽, 柳征, 姜文利. 生物基因技术在多功能雷达信号解析中的应用[J]. 电子学报, 2013, 41(12): 2374–2381. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.009).
MA Shuang, LIU Zheng, and JIANG Wenli. The application of gene techniques to multifunction radar signal analysis[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(12): 2374–2381. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2013.12.009).
- [54] ZHANG Kun, KONG Weiren, LIU Peipei, *et al.* Assessment and sequencing of air target threat based on intuitionistic fuzzy entropy and dynamic VIKOR[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2018, 29(2): 305–310. doi: [10.21629/JSEE.2018.02.11](https://doi.org/10.21629/JSEE.2018.02.11).
- [55] ZHAO Ruoqing, YANG Fengbao, JI Linna, *et al.* Dynamic air target threat assessment based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets, game theory, and evidential reasoning methodology[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 6652706. doi: [10.1155/2021/6652706](https://doi.org/10.1155/2021/6652706).
- [56] HUANG Lida, CAI G, YUAN Hongyong, *et al.* A hybrid approach for identifying the structure of a Bayesian network model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 131: 308–320. doi: [10.1016/j.eswa.2019.04.060](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.04.060).
- [57] GAO Yang, LI Dongsheng, and ZHONG Hua. A novel target threat assessment method based on three-way decisions under intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making environment[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 87: 103276. doi: [10.1016/j.engappai.2019.103276](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103276).
- [58] 翟翔宇. 基于全连接神经网络的空战目标威胁评估方法研究[D]. [硕士论文], 中北大学, 2020. doi: [10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.000590](https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.000590).
ZHAI Xiangyu. Research on threat assessment method of air combat target based on fully connected neural network[D]. [Master dissertation], North University of China, 2020. doi: [10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.000590](https://doi.org/10.27470/d.cnki.ghbgc.2020.000590).
- [59] 王永坤, 郑世友, 邓晓波. 基于极限学习机的目标智能威胁感知技术[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(4): 387–393. doi: [10.3969/k.issn.1672-2337.2020.04.006](https://doi.org/10.3969/k.issn.1672-2337.2020.04.006).
WANG Yongkun, ZHENG Shiyu, and DENG Xiaobo. Intelligent threat perception of aerial target based on extreme learning machine[J]. *Radar Science and*

- Technology*, 2020, 18(4): 387–393. doi: [10.3969/k.issn.1672-2337.2020.04.006](https://doi.org/10.3969/k.issn.1672-2337.2020.04.006).
- [60] MA Shidong, ZHANG Hongzhi, and YANG Guoqing. Target threat level assessment based on cloud model under fuzzy and uncertain conditions in air combat simulation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 49–53. doi: [10.1016/j.ast.2017.03.033](https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.03.033).
- [61] 张才坤, 朱战霞, 冯琦, 等. 基于区间数雷达图的可视化空战威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(5): 1052–1058. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.13).
- ZHANG Caikun, ZHU Zhanxia, FENG Qi, et al. Visualization threat assessment for air combat based on interval-radar chart[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(5): 1052–1058. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.13](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.13).
- [62] 奚之飞, 徐安, 寇英信, 等. 基于灰主成分的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 147–155. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.18](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.18).
- XI Zhifei, XU An, KOU Yingxin, et al. Air combat target threat assessment based on gray principal component[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(1): 147–155. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.18](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2021.01.18).
- [63] 胡涛, 王栋, 孙曜, 等. 基于改进CRITIC-LRA和灰色逼近理想解排序法的空战威胁评估[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2561–2569. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2020.12.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2020.12.022).
- HU Tao, WANG Dong, SUN Yao, et al. Air combat threat assessment of improved CRITIC-LRA and grey TOPSIS[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(12): 2561–2569. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2020.12.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2020.12.022).
- [64] 杨爱武, 李战武, 李宝, 等. 基于动态变权重的空战态势评估[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1553–1563. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.023).
- YANG Aiwu, LI Zhanwu, LI Bao, et al. Air combat situation assessment based on dynamic variable weight[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1553–1563. doi: [10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1093.2021.07.023).
- [65] 杨爱武, 李战武, 徐安, 等. 基于RS-CRITIC的空战目标威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(12): 2357–2365. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0638](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0638).
- YANG Aiwu, LI Zhanwu, XU An, et al. Threat assessment of air combat target based on RS-CRITIC[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(12): 2357–2365. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0638](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0638).
- [66] 范翔宇, 王红卫, 索中英, 等. 基于粗糙集-信息熵的辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(8): 1755–1761. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0663](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0663).
- FAN Xiangyu, WANG Hongwei, SUO Zhongying, et al. Radiator threat evaluating method based on rough set and information entropy[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(8): 1755–1761. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0663](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0663).
- [67] 吴鹏程, 王星, 周东青, 等. 基于熵权的灰色关联辐射源威胁评估[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(6): 58–63. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.011).
- GUO Pengcheng, WANG Xing, ZHOU Dongqing, et al. A grey correlation method based on entropy weight in emitter threat assessment[J]. *Journal of Air Force University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2016, 17(6): 58–63. doi: [10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-3516.2016.06.011).
- [68] 董鹏宇, 王红卫, 陈游. 基于博弈论的GRA-TOPSIS辐射源威胁评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(10): 1973–1981. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0543](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0543).
- DONG Pengyu, WANG Hongwei, and CHEN You. GRA-TOPSIS emitter threat assessment method based on game theory[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(10): 1973–1981. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0543](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0543).
- [69] 徐宇恒, 程嗣怡, 庞梦洋. 基于CRITIC-TOPSIS的动态辐射源威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 2168–2175. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0585](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0585).
- XU Yuheng, CHENG Siyi, and PANG Mengyang. Dynamic radiator threat assessment based on CRITIC-TOPSIS[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2020, 46(11): 2168–2175. doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0585](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0585).
- [70] 张莹, 王红卫, 陈游. 基于ICW-RCM的辐射源组合威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(3): 557–562. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.03.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.03.11).
- ZHANG Ying, WANG Hongwei, and CHEN You. Combined emitter threat assessment based on ICWM-RCM[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(3): 557–562. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.03.11](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.03.11).
- [71] 李健伟, 刘璘, 吴宏超, 等. 机载有源相控阵雷达给告警器带来的威胁[J]. 雷达与对抗, 2014, 34(2): 14–17, 34. doi: [10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2014.02.005](https://doi.org/10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2014.02.005).
- LI Jianwei, LIU Lin, WU Hongchao, et al. Threats to radar warning receiver that airborne active phased array radars bring[J]. *Radar & ECM*, 2014, 34(2): 14–17, 34. doi: [10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2014.02.005](https://doi.org/10.19341/j.cnki.issn.1009-0401.2014.02.005).
- [72] GURBUZ S Z, GRIFFITHS H D, CHARLISH A, et al. An overview of cognitive radar: Past, present, and future[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(12): 6–18. doi: [10.1109/MAES.2019.2953762](https://doi.org/10.1109/MAES.2019.2953762).
- [73] HAYKIN S. Cognitive radar: A way of the future[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2006, 23(1): 30–40. doi: [10.1109/MSP.2006.1593335](https://doi.org/10.1109/MSP.2006.1593335).
- [74] 蒋平虎, 苏萍贞. 关于机载电子战技术发展的思考[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(2): 56–60. doi: [10.16328/j.htdz8511.2018](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2018).

02.015.

JIANG Pinghu and SU Pingzhen. On the consideration of the development of airborne electronic warfare technology[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2018, 34(2): 56-60. doi: [10.16328/j.htdz8511.2018.02.015](https://doi.org/10.16328/j.htdz8511.2018.02.015).

- [75] 谷康, 李亚明, 刘平. 智能化电子对抗装备发展[J]. 国防科技, 2018, 39(2): 78-81, 90. doi: [10.13943/j.j.issn1671-4547.2018.02.13](https://doi.org/10.13943/j.j.issn1671-4547.2018.02.13).

GU Kang, LI Yaming, and LIU Ping. Research on the development of intelligent electronic countermeasures equipment[J]. *National Defense Science and Technology*, 2018, 39(2): 78-81, 90. doi: [10.13943/j.j.issn1671-4547.2018.02.13](https://doi.org/10.13943/j.j.issn1671-4547.2018.02.13).

- [76] 王星, 周一鹏, 陈游, 等. 一种采用前后端并行处理机制的机载

雷达告警器及其数据处理方法[P]. 中国, 112130141A, 2020.

WANG Xing, ZHOU Yipeng, CHEN You, *et al.* An airborne radar warning device with front and rear end parallel processing mechanism and its data processing method[P]. CN, 112130141A, 2020.

- [77] SUTTERFIELD B, HOSCHETTE J A, and ANTON P. Future integrated modular avionics for jet fighter mission computers[C]. 2008 IEEE/AIAA 27th Digital Avionics Systems Conference, St. Paul, USA, 2008. doi: [10.1109/DASC.2008.4702749](https://doi.org/10.1109/DASC.2008.4702749).

- [78] SHAJI R S, DEV V S, and BRINDHA T. A methodological review on attack and defense strategies in cyber warfare[J]. *Wireless Networks*, 2019, 25(6): 3323-3334. doi: [10.1007/s11276-018-1724-1](https://doi.org/10.1007/s11276-018-1724-1).

作 者 简 介

王 星, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

王俊迪, 博士生, 研究方向为电子对抗原理与技术。

金政芝, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电子对抗装备总体。

周一鹏, 博士, 讲师, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

陈 游, 博士, 副教授, 主要研究方向为电子对抗原理与技术。

(责任编辑: 高华)