

doi: 10.7690/bgzd.2024.03.018

一种雷达抗干扰模拟训练系统

孔德强, 杨保平, 张秀媛

(航天工程大学士官学校, 北京 102299)

摘要: 为提高雷达抗干扰训练效益, 设计一种数据级雷达抗干扰模拟训练系统。在构建系统体系架构的基础上, 分析雷达性能参数计算模型, 以及雷达压制式干扰和欺骗式干扰的信号模型。对训练场景编辑、雷达仿真终端、干扰机仿真终端和雷达抗干扰训练策略等软件进行设计与实现。通过构建典型战术对抗场景, 以抗窄脉冲干扰为例, 对几种抗干扰措施的有效性进行仿真。该系统已应用于教学训练实践, 系统性价比较高, 具有一定推广价值。

关键词: 雷达; 抗干扰; 模拟训练; 系统设计

中图分类号: TN97 **文献标志码:** A

Radar Anti-jamming Simulation Training System

Kong Deqiang, Yang Baoping, Zhang Xiuyuan

(Sergeant School, Aerospace Engineering University, Beijing 102299, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of radar anti-jamming training, a data-level radar anti-jamming simulation training system is designed. On the basis of constructing the system architecture, the calculation model of radar performance parameters and the signal model of radar blanket jamming and deception jamming are analyzed. Design and implement the software of training scene editing, radar simulation terminal, jammer simulation terminal and radar anti-jamming training strategy. By constructing a typical tactical countermeasure scenario, the effectiveness of several anti-jamming measures is simulated by taking anti-narrow pulse jamming as an example. The system has been applied to teaching and training practice, which shows that the system has high cost performance and certain promotion value.

Keywords: radar; anti-jamming; simulation training; system design

0 引言

雷达作为“三军之眼”, 在现代战争中起到至关重要的作用。当雷达接收到的信号中含有目标回波以外的电磁信号时, 就会影响雷达对目标回波信号的检测, 称之为干扰^[1-2]。按照干扰信号的不同, 目标回波信号的作用原理可分为压制式干扰和欺骗式干扰^[3-4]。雷达抗干扰, 是指为降低或消除干扰信号对己方雷达使用效能的影响而采取的措施及其行动, 其目的是在与敌方的电子对抗中保证己方雷达顺利完成任务^[5-6]。复杂电磁环境下, 雷达装备作战能力很大程度受制于其抗干扰能力, 尤其是装备操作手的快速应变和正确处置能力, 亟需开展雷达抗干扰训练^[7]。

目前, 雷达装备的干扰环境构设难度较大, 且利用实装雷达进行抗干扰训练存在严重泄密风险^[8-9]; 因此, 利用模拟训练平台开展雷达抗干扰训练, 具有经济、安全、高效等特点, 是提高雷达装备操作手抗干扰能力的重要手段^[10-11]。

1 训练系统体系结构

雷达抗干扰模拟训练系统主要包括雷达抗干扰训练软件和雷达抗干扰策略训练软件, 其中雷达抗干扰训练软件主要包含训练场景编辑、雷达仿真终端和干扰机仿真终端等模块, 如图 1 所示。训练场景编辑模块主要完成仿真控制、参数设置和态势显示等功能; 干扰机仿真终端接收到雷达信号后, 结合设置的干扰参数, 产生雷达干扰信号, 传输给雷达仿真终端, 并进行信号显示; 雷达仿真终端能够产生雷达信号, 处理接收到的雷达回波信号并进行目标航迹显示。当存在雷达干扰信号时, 启动雷达抗干扰措施进行抗干扰训练。雷达抗干扰策略训练软件相对独立, 主要用于雷达装备操作手的抗干扰理论学习。

2 系统仿真模型

2.1 雷达性能参数计算模型

雷达装备性能仿真通常涉及信噪比、作用距离、测角精度、信干比、干扰条件下作用距离、被动跟

收稿日期: 2023-11-11; 修回日期: 2023-12-15

基金项目: 军内科研项目(1700050410); 航天工程大学重点学科教研创新项目(LLCXZKT26705)

第一作者: 孔德强(1982—), 男, 河南人, 硕士。

踪干燥比、被动跟踪角精度、发现概率等性能参数计算。本平台的雷达性能参数计算所涉及的计算模型如图2所示。

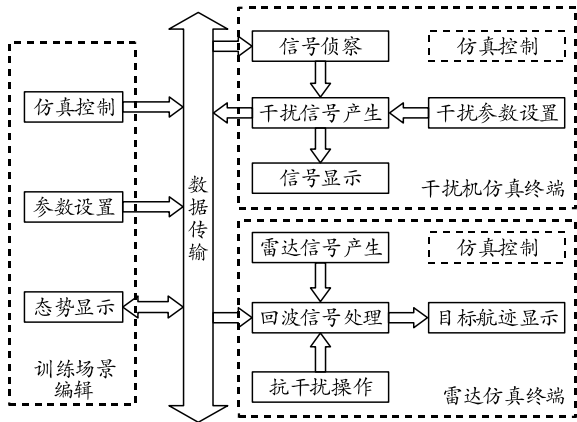


图 1 系统体系结构

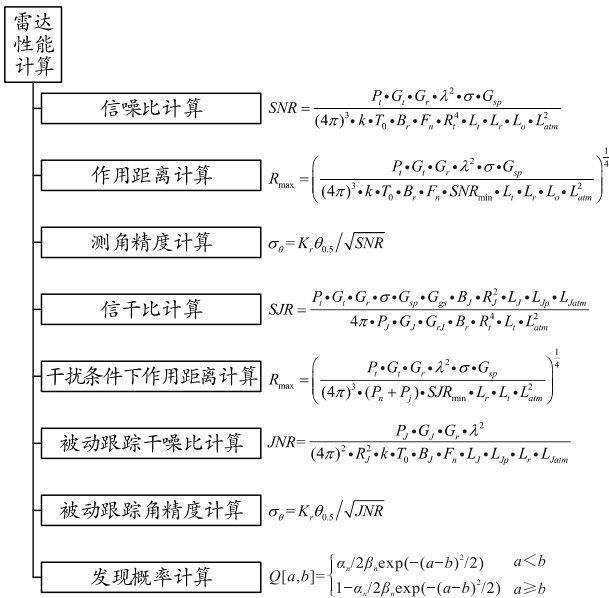


图 2 雷达主要性能参数计算模型

2.2 雷达压制式干扰信号模型

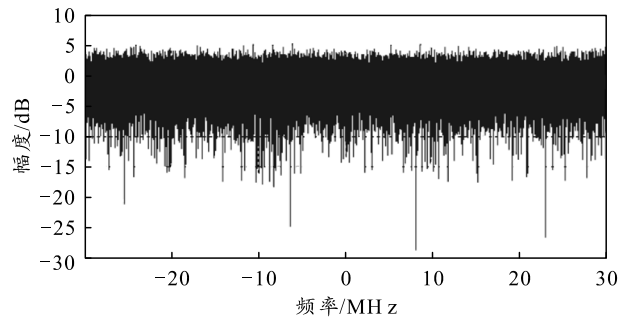
按干扰的作用机理，雷达干扰类型包括压制式干扰和欺骗式干扰，其中压制式干扰主要包括宽带阻塞式噪声干扰、窄带瞄准式噪声干扰、扫频式噪声干扰、梳状谱噪声干扰等样式^[12-13]。宽带阻塞式噪声干扰是最常见的压制干扰样式，其干扰信号宽带宽度通常为雷达信号带宽的几十倍以上，甚至覆盖雷达的一个工作频段，对频率引导精度要求降低，便于同时干扰频率分集雷达、频率捷变雷达和多部不同工作频率的雷达。宽带阻塞式噪声干扰通常采用射频噪声干扰，干扰信号为：

$$J(t) = U_n(t) \exp[j\omega_c t + j\phi(t)] \quad (1)$$

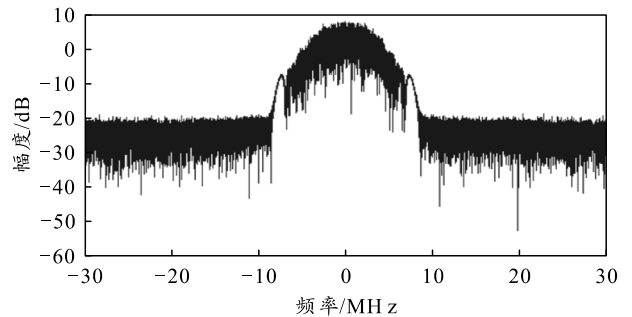
式中：包络函数 $U_n(t)$ 服从瑞利分布；相位函数 $\phi(t)$

服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布，且与 $U_n(t)$ 相互独立； $J(t)$ 服从正态分布；载频 ω_j 为常数，且远大于 $J(t)$ 的谱宽。

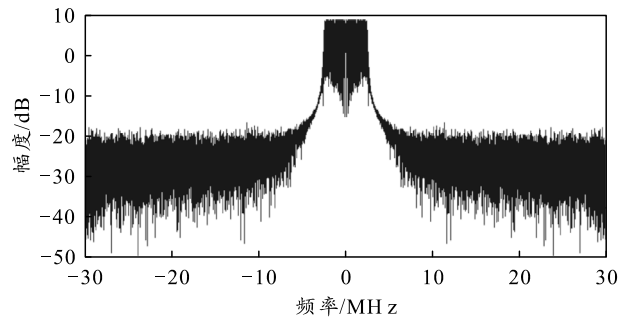
窄带瞄准噪声干扰的干扰模型与宽带阻塞式噪声相同，其干扰带宽是雷达接收机带宽的 2~3 倍，需要在侦测雷达工作频率的基础上实施干扰，干扰效率较高。扫频式噪声干扰结合了瞄准式噪声干扰和阻塞式噪声干扰的特点，在任一时刻干扰机产生的干扰信号带宽与瞄准式一样，与雷达的信号带宽相当，但干扰信号频率又在一个更宽的频率范围内周期变化，相当于以干扰信号带宽在大范围内扫频，扫频方式可分为锯齿扫频和三角波扫频等。梳状谱噪声干扰是一系列频点上产生按某种方式调制的一组窄带干扰信号，当各频点上的干扰信号带宽大于或等于信号频率间隔时，梳状谱干扰成为类似于宽带阻塞式噪声干扰的压制性干扰，避免了瞬时频率间隙内的功率浪费。典型压制式干扰样式的信号仿真如图 3 所示。



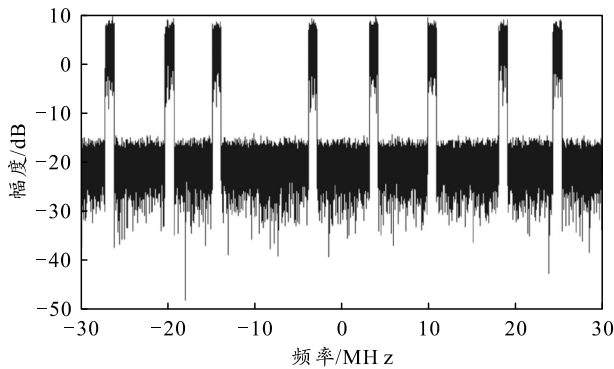
(a) 宽带阻塞干扰信号(频域)



(b) 窄带瞄准噪声调频干扰信号(频域)



(c) 扫频式噪声干扰信号(频域)



(d) 梳状谱干扰信号(频域)

图 3 3 GHz 典型压制式干扰样式的信号仿真

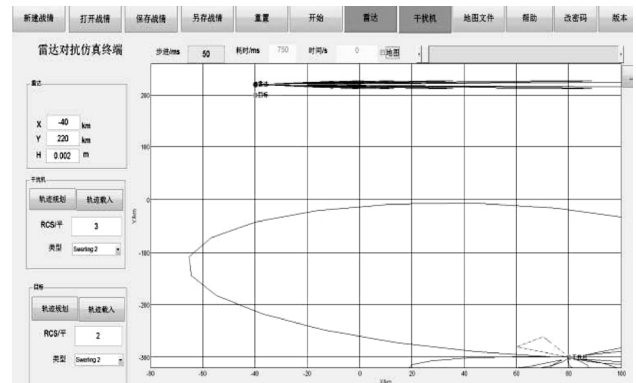
2.3 欺骗式干扰信号模型

欺骗式干扰主要包括距离多假目标干扰、前沿复制干扰、开窗干扰等，其中距离多假目标干扰是最常见的欺骗式干扰^[14]。距离多假目标干扰是建立航迹关联的虚假目标，其实现方法主要包括脉冲延迟叠加和信号移频。脉冲延迟叠加，是指干扰机对复制的假目标信号在时域上进行延时叠加，雷达接收到假目标信号后进行脉冲压缩处理，此时形成的假目标将比较密集，其密集程度由干扰机复制脉冲的延时大小决定。对线性调频信号进行干扰时，如果在转发的信号中增加一个多普勒移频分量，就会使雷达产生一个假目标，根据增加的多普勒分量的正负情况可推断假目标在目标前、目标后。

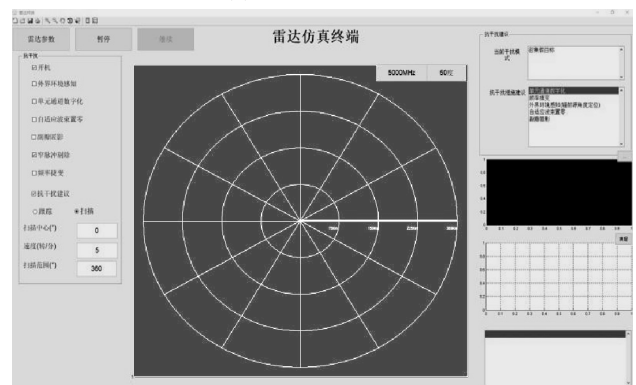
3 软件系统设计实现

雷达抗干扰模拟训练系统由硬件平台和软件系统组成，其中软件系统采用 Matlab 开发，主要包括训练场景编辑、雷达仿真终端、干扰机仿真终端、雷达抗干扰训练策略等模块。训练场景编辑模块如图 4(a)所示，其仿真控制功能主要包括新建战情、打开战情、保存战情、另存战情、战情重置、开始/暂停、仿真进度显示、仿真时间和步进控制等；参数设置主要完成雷达位置设置、干扰机 RCS 设置、干扰机运动轨迹设置、探测目标 RCS、探测目标运动轨迹设置等；态势显示用于显示战情态势，包括干扰机平台运动轨迹、雷达位置、干扰机平台位置、雷达波束等。雷达仿真终端，用于实现雷达信号产生、信号处理、目标航迹显示、抗干扰操作等数据级仿真，支持副瓣匿影、自适应波束置零、窄脉冲剔除等抗干扰措施，输出参数包括雷达最大作用距离、最小作用距离、观测(方位)空域、测量精度和分辨力等。通过改变雷达仿真终端工作参数，可仿真不同型号雷达的目标探测和受干扰情况，如图 4(b)

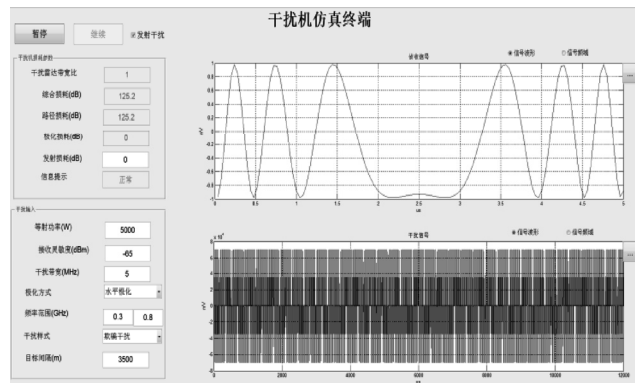
所示。干扰机仿真终端实现信号侦察、干扰信号产生、信号显示等数据级仿真，具备仿真控制、干扰损耗显示、干扰参数输入、侦收信号显示和干扰信号显示等功能。干扰机仿真终端能够实现与雷达仿真终端之间的信息交互，配合进行雷达抗干扰训练，如图 4(c)所示。雷达抗干扰策略训练模块具有独立训练和联合训练 2 种模式，如图 4(d)所示。独立训练模式下，雷达干扰模式和雷达抗干扰策略训练分别独立运行，其中雷达干扰模式列表显示样式，以及该干扰样式的原理、优点、缺点等基础知识，并提示教学图片；雷达抗干扰策略列表显示抗干扰手册中的抗干扰措施，以及该抗干扰措施的原理、优点、缺点等基础知识，并提示教学图片。



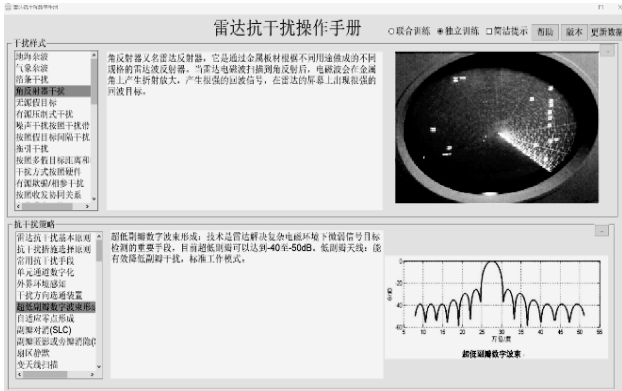
(a) 训练场景编辑



(b) 雷达仿真终端



(c) 干扰机仿真终端



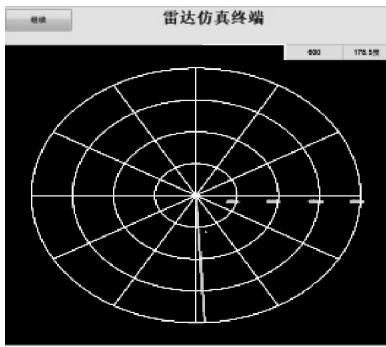
(d) 雷达抗干扰策略训练

图 4 雷达抗干扰模拟训练系统

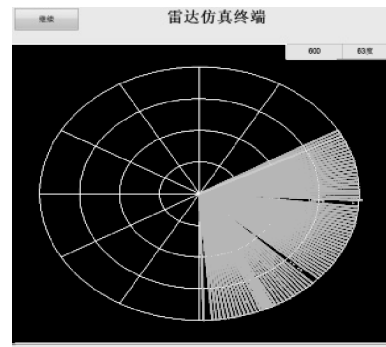
4 抗干扰效果展示

为展示雷达抗干扰模拟训练系统的抗干扰训练效果，以雷达遭受窄脉冲干扰为例进行展示。打开雷达抗干扰操作训练软件，在雷达对抗仿真终端设

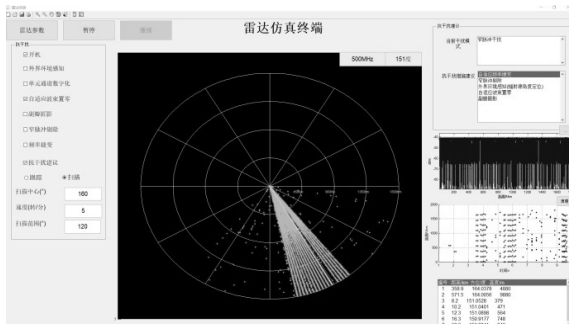
置雷达平面坐标为(-40 km, 220 km)，干扰机和探测目标在(80 km, -300 km)周围的区域运动。在雷达终端设置雷达参数：峰值功率为1 000 kW，中心频率0.5 GHz，脉冲宽度为20 μs，脉冲重复周期12 ms，信号带宽5 MHz，工作带宽100 MHz，天线波束宽度5°，扫描中心160°，转速5 r/min，天线扫描范围120°，无干扰情况下，雷达可正常探测目标，如图5(a)所示。在干扰机终端，设置干扰样式为窄脉冲干扰，干扰频率为0.49~0.51 GHz，干扰功率为1 kW，干扰带宽5 MHz，目标间隔2 000 m，选择“发射干扰”。在雷达对抗仿真终端，点击“开始”按钮，开始训练仿真，雷达遭受干扰后无法正常探测目标，如图5(b)所示。在雷达仿真终端观察雷达受干扰后，分别采取自适应波束置零、副瓣匿影^[15]、窄脉冲剔除、频率捷变抗干扰措施，抗窄脉冲干扰效果如图5(c)~(f)所示。



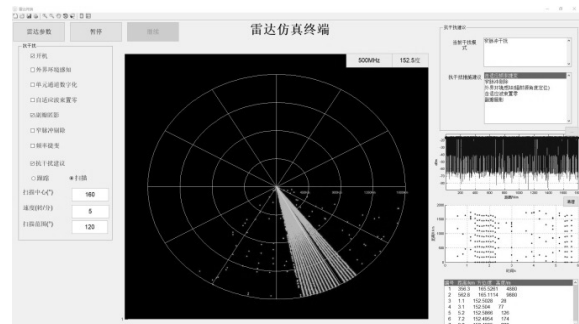
(a) 无干扰条件下正常探测目标



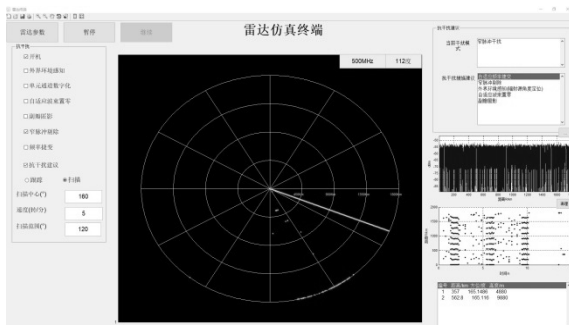
(b) 遭受窄脉冲干扰后干扰画面



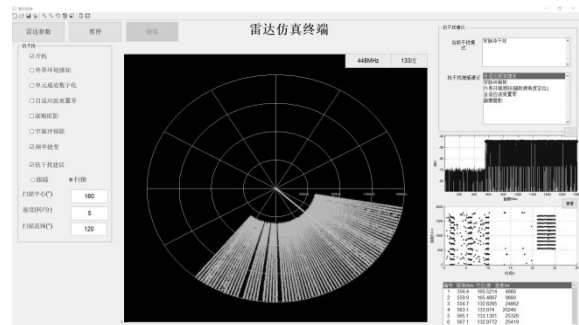
(c) 自适应波束置零抗干扰效果



(d) 副瓣匿影抗干扰效果



(e) 窄脉冲剔除抗干扰效果



(f) 频率捷变抗干扰效果

图 5 抗窄脉冲干扰效果

由上图可知，采取窄脉冲剔除抗干扰措施后，抗窄脉冲干扰效果比较明显。

5 结束语

根据雷达抗干扰仿真训练需求，设计雷达抗干扰模拟训练软件系统。在进行系统体系设计的基础上，选取雷达性能参数计算模型，对雷达典型压制式干扰、欺骗式干扰的信号模型进行信号仿真，对系统软件的训练场景编辑、雷达仿真终端、干扰机操作界面仿真终端、雷达抗干扰训练策略等模块分别进行设计实现，并对典型抗干扰措施抗窄脉冲干扰的效果进行展示。该系统已应用于教学实践，帮助学员训练雷达抗干扰操作技能，取得了良好的教学效果，性价比较高，具有一定推广价值。

参考文献：

- [1] 祁迪. 雷达抗干扰技术难点问题及对策研究[J]. 通信电声, 2019, 43(4): 39-41.
- [2] 张凯旋, 李淑华. 雷达抗干扰技术现状及发展趋势研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(11): 1-4, 17.
- [3] 滕小虎. 雷达抗干扰技术现状及发展探索[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(7): 208-209.
- [4] 邓文林. 复杂电磁环境下的雷达抗干扰技术[J]. 电子

(上接第 81 页)

- [21] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm[J]. Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological), 1977, 39(1): 1-38.
- [22] LAURITZEN S L, SPIEGELHALTER D J. Local Computations with Probabilities on Graphical Structures

(上接第 86 页)

- [17] ZIO E, BARALDI P, LIBRIZZE M, et al. A fuzzy set-based approach for modeling dependence among human errors[J]. Fuzzy Sets and System, 2009, 160(13): 1974-1964.
- [18] LI P C, CHEN G H, DAI L C, et al. Fuzzy logic-based approach for identifying the risk importance of human error[J]. Safety Science, 2010, 48(7): 902-913.

技术与软件工程, 2020(5): 70-71.

- [5] 唐斌, 赵源, 蔡天一, 等. 雷达抗有源干扰技术现状与展望[J]. 数据采集与处理, 2016, 31(4): 623-639.
- [6] 郭建明, 李建勋, 吕强. 雷达抗干扰方法及其发展趋势综述[J]. 雷达与电子战, 2007(2): 1-6.
- [7] 秦新红, 李增荣. 机载火控雷达抗干扰措施使用策略分析[J]. 海军装备, 2015(2): 63-64.
- [8] 吴少鹏. 雷达抗干扰探测能力体系与技术发展研究[J]. 雷达与对抗, 2018, 38(1): 1-3, 17.
- [9] 杨立永. 雷达抗干扰辅助训练软件[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 53-56.
- [10] 徐绵起, 王斌, 徐瀚智, 等. 便携式地基雷达抗干扰训练机的设计[J]. 电子工程, 2012(2): 35-38.
- [11] 曾益君. 一种多平台雷达模拟系统设计与实现[J]. 科技信息, 2011(17): 67-68.
- [12] 熊永坤, 王东阳. 复杂电磁环境下雷达抗干扰技术[J]. 科技与创新, 2017(7): 57-58.
- [13] 孟宪猛, 蔡翠翠, 张东. 基于多层次模糊算法的雷达抗干扰性能分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4): 59-62.
- [14] 祝欢, 孙俊, 杨予昊, 等. 基于环境感知的认知雷达抗干扰技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(6): 577-581.
- [15] 高其嘉, 李建勋, 王晓莉. 雷达副瓣匿影性能评估方法[J]. 现代雷达, 2018(7): 14-18, 46.

and Their Application to Expert Systems[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1988, 50(2): 157-224.

- [23] 周旋. 基于贝叶斯网络的作战效能评估与分析方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [24] FARNAZ A, SONG S Q, CRAIG A S. Comparative analysis of discretization methods in Bayesian networks[J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 87: 64-71.
- [19] SWAIN A D, GUTTMANN H E. Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications (NUREG/CR-1278)[R]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, 1983.
- [20] PARK K S, JUNG K T. Considering performance shaping factors in situation-specific human error probabilities[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1996, 18(4): 325-331.