

文章编号: 2095-4980(2022)02-0133-07

面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统设计

安红, 张朔, 赵耀东, 高由兵, 杨莉

(电子信息控制重点实验室, 四川 成都 610036)

摘要: 针对认知电子战装备面临的作战场景复杂多样、真实数据难以获取、实战训练成本高昂等问题, 为满足认知电子战系统方案论证、关键技术研究需求, 将人工智能技术与系统仿真技术相结合, 通过建立认知电子战装备及其典型作战对象的信号级模型, 以及模拟电子战装备与作战对象在复杂电磁环境下的信息交互过程, 构建面向未来战场认知对抗的学习训练与仿真评估系统。本文对系统的功能、体系结构、工作流程和关键模块/模型等方面进行了详细介绍, 并对系统应用实例进行了分析。从应用效果看, 系统可为认知电子战的智能算法模型训练、装备作战能力仿真试验评估提供研究手段。

关键词: 认知电子战; 信号级仿真; 学习训练; 仿真评估; 系统设计

中图分类号: TN97

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021332

Design of learning training and simulation evaluation system for cognitive electronic warfare

AN Hong, ZHANG Suo, ZHAO Yaodong, GAO Youbing, YANG Li

(Key Laboratory of Electronic Information Control, Chengdu Sichuan 610036, China)

Abstract: There are many problems faced by cognitive Electronic Warfare (EW) equipment, including complex and diverse combat scenes, being difficult to obtain real data and high cost of actual combat training. In order to meet the needs of scheme demonstration and key technology research, by combining artificial intelligence with system simulation technology, the signal level model of cognitive EW equipment and its typical combat objects is established. The information interaction process between EW equipment and combat objects in complex electromagnetic environment is simulated. A learning training and simulation evaluation system for future battlefield cognitive confrontation is built. The function, architecture, workflow and key modules/models of the system are introduced in detail. The application examples of the system are analyzed. According to the application effect, the system can provide guidance for intelligent algorithm model training of cognitive EW and the simulation test evaluation on equipment combat capability.

Keywords: cognitive electronic warfare; signal level simulation; learning and training; simulation evaluation; system design

随着技术的发展, 现代电子信息装备都在向数字化方向快速演进, 特别是新型数字可编程雷达可以根据目标探测要求自适应地快速生成各种复杂波形信号, 从而使得对抗它们更加困难。同时, 随着民用和军事用频设备数量的快速增长, 电磁频谱变得越来越拥挤。在此背景下, 电子战装备必须更加智能, 才能适应电磁环境的变化和威胁对象的发展。为此, 美军在 2010 年提出了认知电子战的概念, 旨在改进电子战系统的工作模式, 发展具有认知能力的自适应电子战技术。目前以提高电子战系统智能化水平为核心, 具备自主感知、实时反应、精准对抗以及在线评估能力的认知电子战技术已成为电子战领域的重要发展方向^[1-4]。

在认知电子战技术领域, 美国是较早开展研究的国家, 先后启动了多个项目持续推进理论架构、智能算法、样机系统等各方面研究, 美国 Exelis 公司 2014 年推出的“破坏者 SRx”系统号称是世界上第一款商用现货型的认知电子战系统。国内也在积极开展认知电子战技术研究, 在目标个体识别、模式状态识别等技术方面取得了一定进展, 但目前尚未见到可用系统的报道^[5-8]。本文针对认知电子战装备面临的作战场景复杂多样、真实数据

难以获取、实战训练成本高昂，以及智能算法需要学习训练、装备作战能力需要仿真验证等问题，为满足认知电子战系统方案论证、智能模型训练及关键技术研究需求，将人工智能技术与系统仿真技术相结合，构建面向未来战场认知对抗的开放式的学习训练与仿真评估系统，重点介绍该系统总体设计思路，以及其支持智能模型训练的应用实例。

1 系统总体设计

1.1 系统功能设计

面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统提供智能模型训练测试和对抗仿真试验评估两大功能项，每个功能项又可细分下去，如图1所示。

1.2 系统体系结构设计

面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统采用业界通用的分层体系结构，包括硬件层、软件基础层、数据层、模型服务层、应用支撑层和应用层，如图2所示。整个系统在软硬件基础环境、数据资源、模型服务、应用支撑服务的支撑下，根据应用需求，完成训练数据生成与管理、智能算法模型训练与测试、认知电子战装备博弈对抗仿真试验评估等业务应用。

图2中，系统硬件设计应能满足各类智能算法模型在学习训练过程中对算力的要求。一方面，机器学习，尤其是深度学习需要大量的并行计算资源，性能强劲的GPU能在几个小时内完成原本CPU需要数月完成的任务，所以目前机器学习领域已全面转向GPU架构，使用GPU完成训练任务。另一方面，为了逼真反映认知电子战装备在复杂对抗场景下面对先进威胁对象的作战能力，博弈对抗仿真试验评估采用中频信号级仿真技术，通过对电子战装备及其各类典型作战对象进行信号级建模，建立相应的电子信息装备数字模型，但由于装备模型内部与装备模型之间均涉及大量的数字信号产生、交互与处理过程的复杂运算，特别是在复杂对抗场景下，仿真运算效率急剧恶化，因此需要在不断优化信号级模型算法性能的基础上，引入并行计算技术，构建信号级并行仿真系统。综上所述，系统的高性能计算设备应选用CPU+GPU异构计算架构，并在此基础上构建服务器集群，使用高速以太网及交换机互联。

近年来随着人工智能理论和技术的飞速发展，各种新的人工智能算法和模型不断被引入电子战领域，但由于目前电子战领域尚缺乏统一的标准数据集，导致新提出的电子战智能算法模型很难相互间进行横向的性能对比评估。因此需要在系统数据资源中构建一个用于认知电子战领域的统一标准数据集，帮助认知电子战技术人员在威胁感知、干扰策略优化、干扰效果评估等技术领域提出的新算法、新模型进行训练、测试和评估。

1.3 系统工作流程设计

面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统工作流程如图3所示，分为智能算法模型训练测试和博弈对抗仿真试验评估2个阶段。

图3中，在智能算法模型训练测试阶段，通过系统提供的外场数据清洗、训练数据标注、训练数据仿真等一系列工具软件，辅助用户生成用于智能算法模型学习训练的训练测试数据集；然后，用户可以利用系统上部署的主流AI开发框架，如TensorFlow、Caffe、Mxnet、Pytorch等，对相关智能算法模型进行开发、调试，利用训练测试数据集进行智能算法模型的离线训练和测试，也可以利用系统提供的在线学习能力，针对具体威胁对象，开展智能算法模型的在线训练与测试；当智能算法模型性能满足预期后，利用系统提供

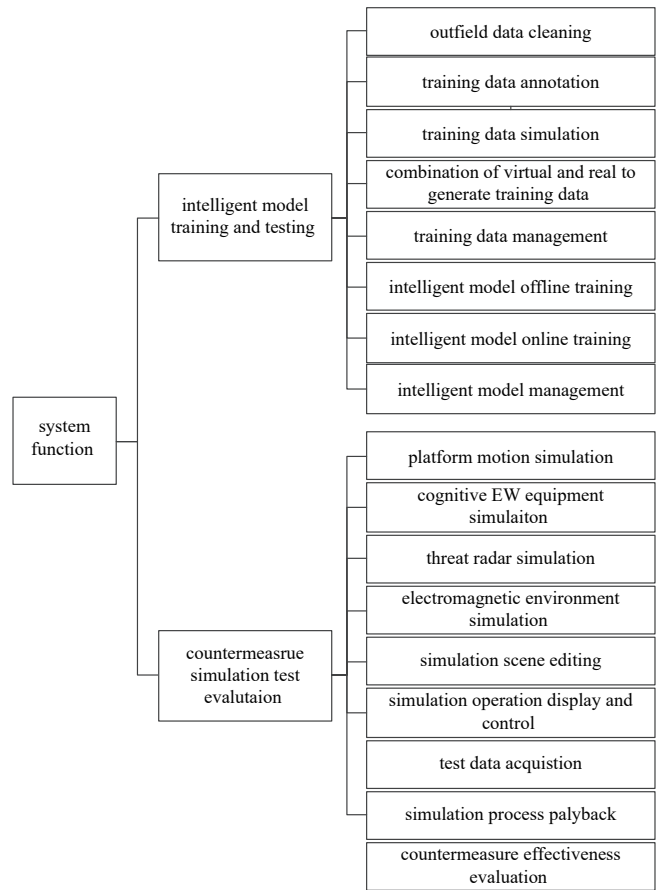


Fig.1 Diagram of system function

图1 系统功能结构图

的认知对抗装备模型框架和智能算法在线推理加速组件，实现智能算法在电子战装备数字模型中的嵌入，生成用于对抗仿真场景下的认知对抗装备整机数字模型。在博弈对抗仿真评估阶段，首先设计博弈对抗仿真场景，将相关装备模型和电磁环境模型部署在高性能计算资源上，通过仿真引擎驱动认知电子战装备在复杂作战场景下与威胁对象的信号级对抗仿真过程，既可以在线分析电子战装备的作战能力，也可以通过在线采集的试验数据进行事后的统计计算，实现对电子战装备对抗效能的离线评估，以考核装备模型功能性能是否满足系统方案设计要求。

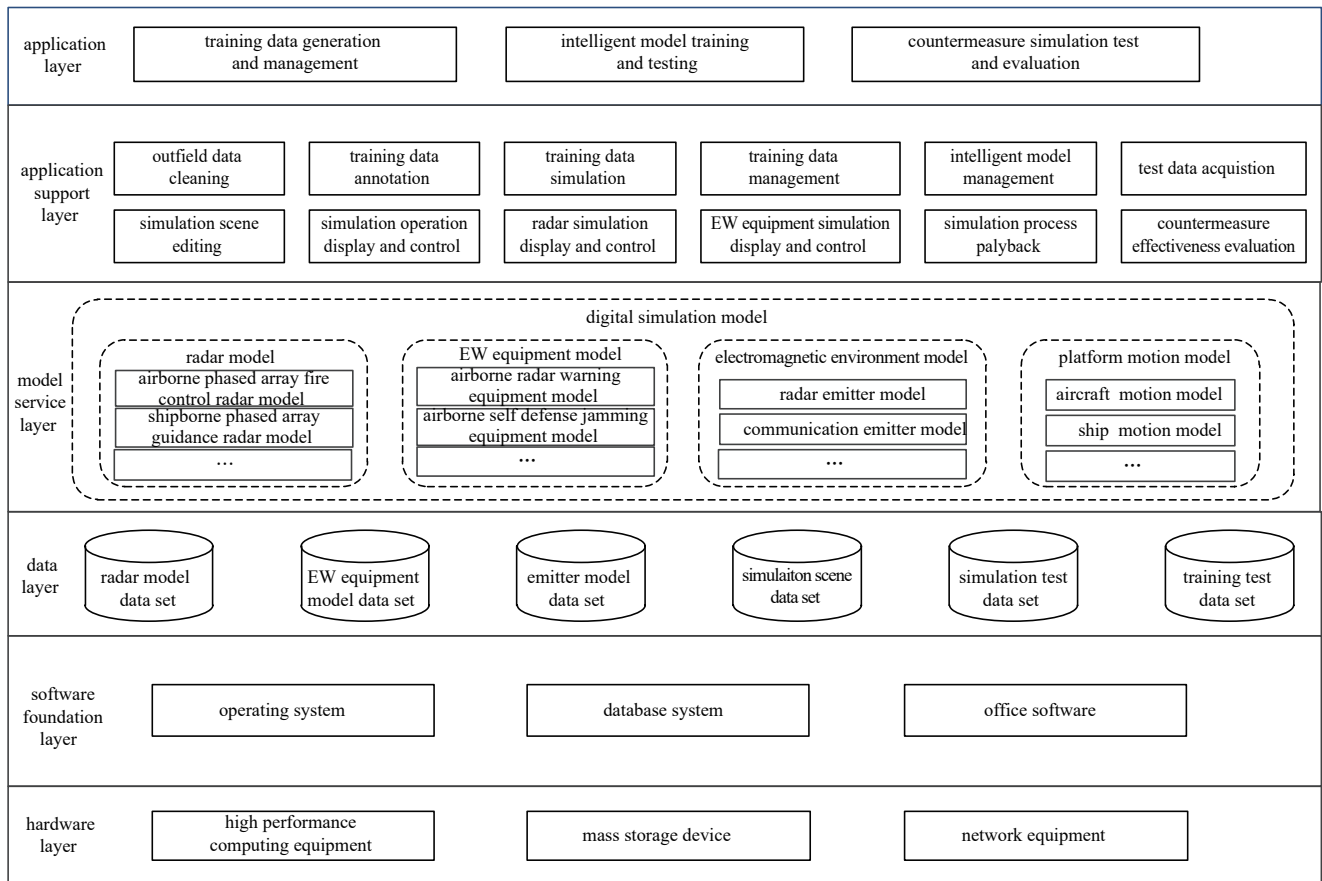


Fig.2 Architecture of system
图2 系统体系结构图

1.4 关键模块/模型设计

1.4.1 训练测试数据集构建

对机器学习而言，提供的训练测试数据的质量、多样性和数据量对智能算法模型训练的成败将产生重大影响。在面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统中，用于训练测试数据集构建的原始数据分为两类：一类是装备在外场采集的全脉冲数据和中频信号数据，另一类是根据训练需求通过数字仿真系统产生的可自带标注或不带标注的全脉冲数据。同时，为了提高数据的多样性，还可以采用虚实结合方式，在电磁信号环境数字仿真基础上，通过接入外场采集的全脉冲数据，按照时间同步推进机制，生成仿真与实测相结合的面向复杂场景的电磁数据。

在面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统中，按照智能算法模型应用领域，可将标准训练测试数据集类型细分为：信号分选数据集、辐射源个体识别数据集、辐射源状态识别数据集、辐射源型号识别数据集、干扰效果评估数据集等。例如，信号分选是根据信号特征参数从随机交叠的脉冲流中分离出各个辐射源信号的过程。目前，雷达信号分选算法的主要输入是雷达信号的脉冲描述字(Pulse Description Word, PDW)数据，包括脉冲到达时间、脉冲载频、脉冲宽度、脉冲幅度、脉冲到达方向角，因此信号分选数据集主要由基于PDW的全脉冲数据组成。由于全脉冲数据中，特别是外场采集的全脉冲数据中通常包含了大量的无用脉冲数据，因此需要利用数据清洗工具软件对外场数据进行清洗，将无用脉冲数据剔除，以便进行后续的数据标注工作。目前用于训练

认知电子战各类智能算法模型的数据主要是文本数据，因此需要针对文本数据开发各种训练数据标注工具软件，如图 4 所示的雷达型号标注工具软件。图 4 中 RF 表示射频(Radio Frequency)，PRI 表示脉冲重复周期(Pulse Repetition Interval)，PW 表示脉冲宽度(Pulse Width)，DOA 表示到达方向(Direction Of Arrival)。

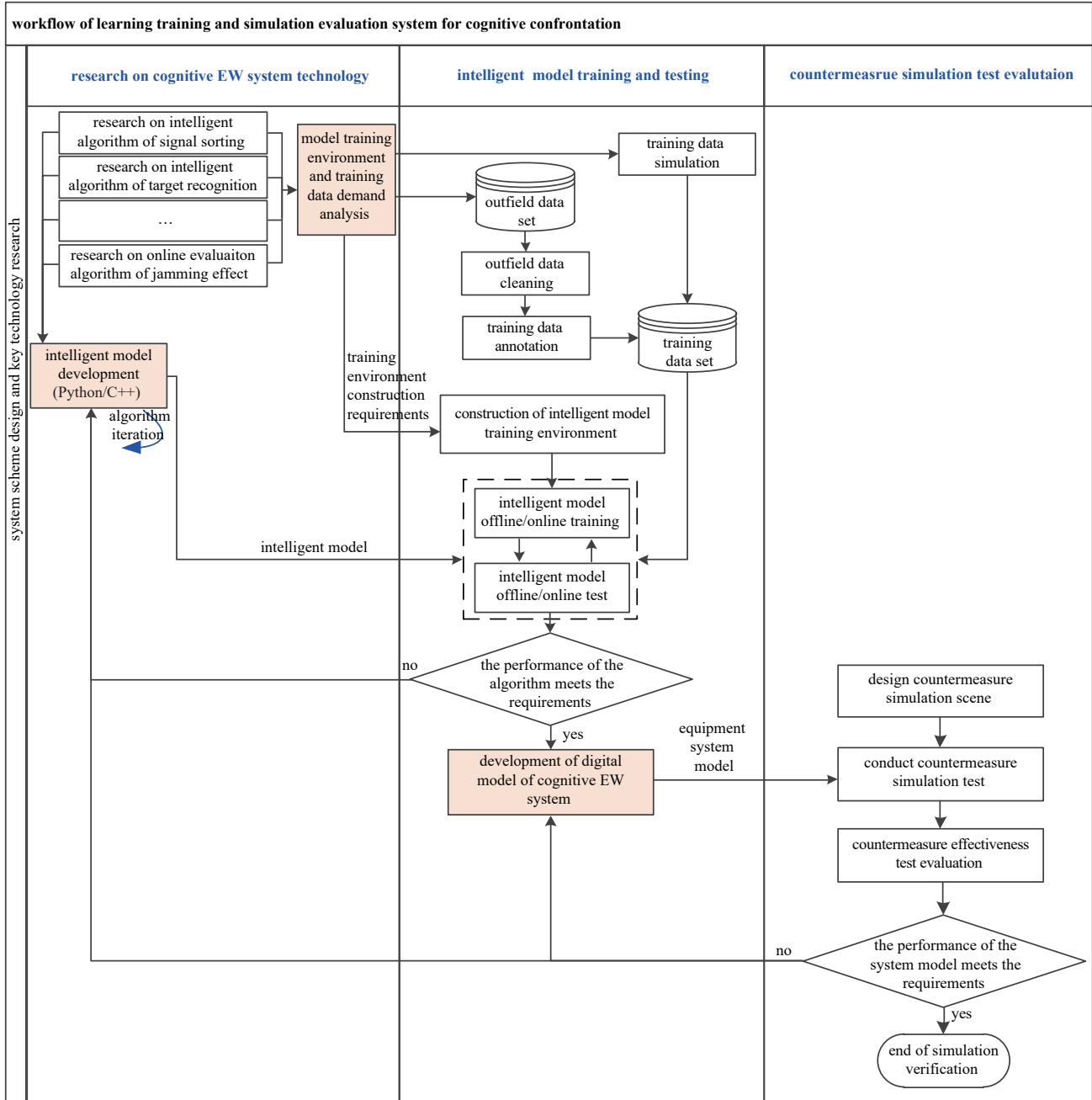


Fig.3 System workflow
图 3 系统工作流程图

1.4.2 认知对抗装备模型设计

虽然目前认知电子战系统技术还处于探索性研究阶段，具体的装备形态和系统架构尚不明确。但可以预期随着认知电子战技术逐渐成熟并进入应用，将极大提高电子战系统对威胁信号的感知、干扰决策和干扰效果评估能力^[1]，因此在如图 5 所示的认知对抗装备模型设计中，以认知电子战技术能力为抓手，依据电子战系统工作原理及工作流程，采用面向对象的 C++ 编程语言实现认知对抗装备模型的主体功能框架构建，一方面应保证模型框架的信息处理流程与原理样机系统方案存在信息流映射关系，另一方面利用组件化技术，通过制订面向组件的输入、输出通用接口规范，实现对信号分选、目标识别、干扰效果评估、干扰决策等体现认知电子战系统智能综合处理能力的算法模型的快速嵌入，以支持对智能算法模型的在线学习训练。

构建认知对抗装备模型的主要目的是为认知电子战关键技术的探索研究提供高效、灵活的虚拟试验平台，而在研究早期，技术路径和应用效果都不明朗，需要“大胆设想、小心求证”逐个去尝试，此时对各种可能的算法模型进行快速实现及仿真验证就变得尤为重要。为了充分发挥 C/C++ 语言和 Python 语言各自的优势，在认知对抗装备模型设计中，针对智能综合处理模块的功能实现，采用如图 6 所示的跨语言联合程序框架，即采用 C/C++ 语言实现认知对抗装备模型的主体功能框架，而对需要频繁且快速替换的智能算法部分则采用编程更为方便的 Python 语言来实现，两者之间通过 Google 公司开发的远程过程调用(Remote Procedure Call, GRPC)组件实现基于网络的数据通信。这样在 Python 环境中，依托 Keras、Tensorflow、Pytorch 等大量成熟的机器学习工具包，研究人员可以快速完成认知电子战相关智能算法模型的开发与调试，而在认知对抗装备模型中，可通过 GRPC 调用相应算法的 Python 版推理模型，即可实现对算法模型的在线训练与测试。

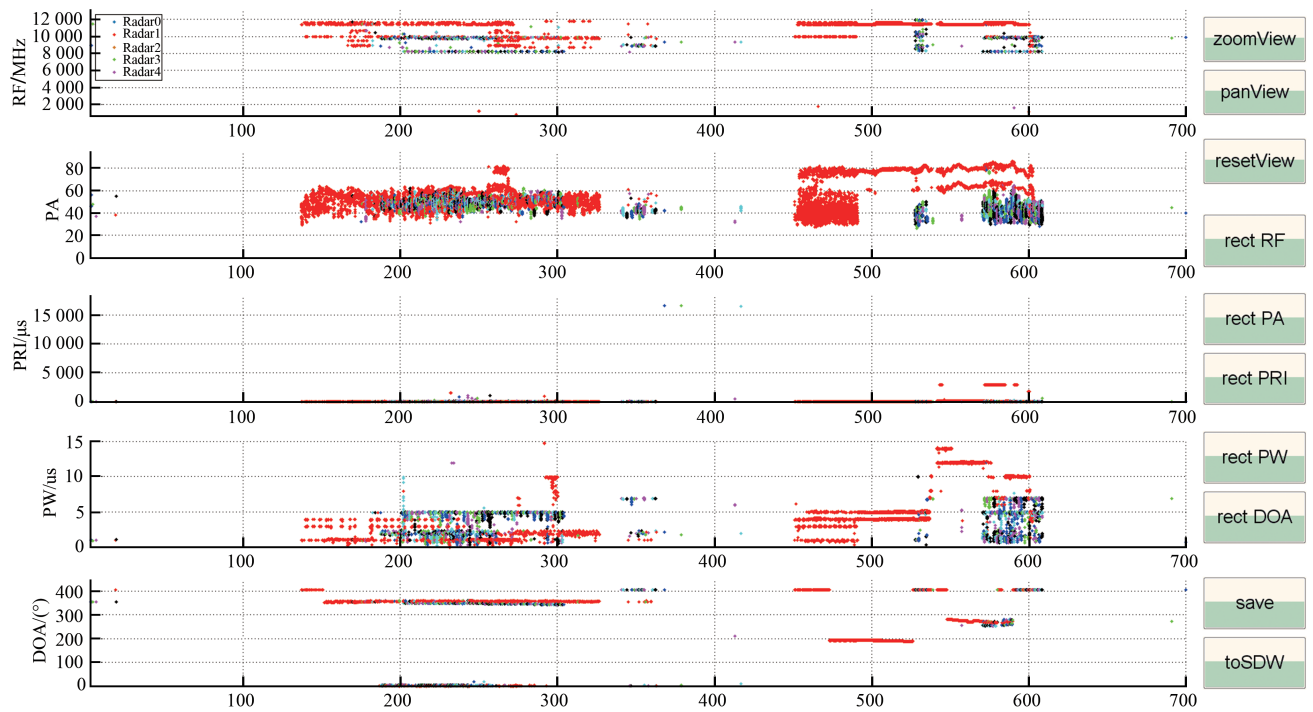


Fig.4 Marking tool software of radar name
图 4 雷达型号标注工具软件

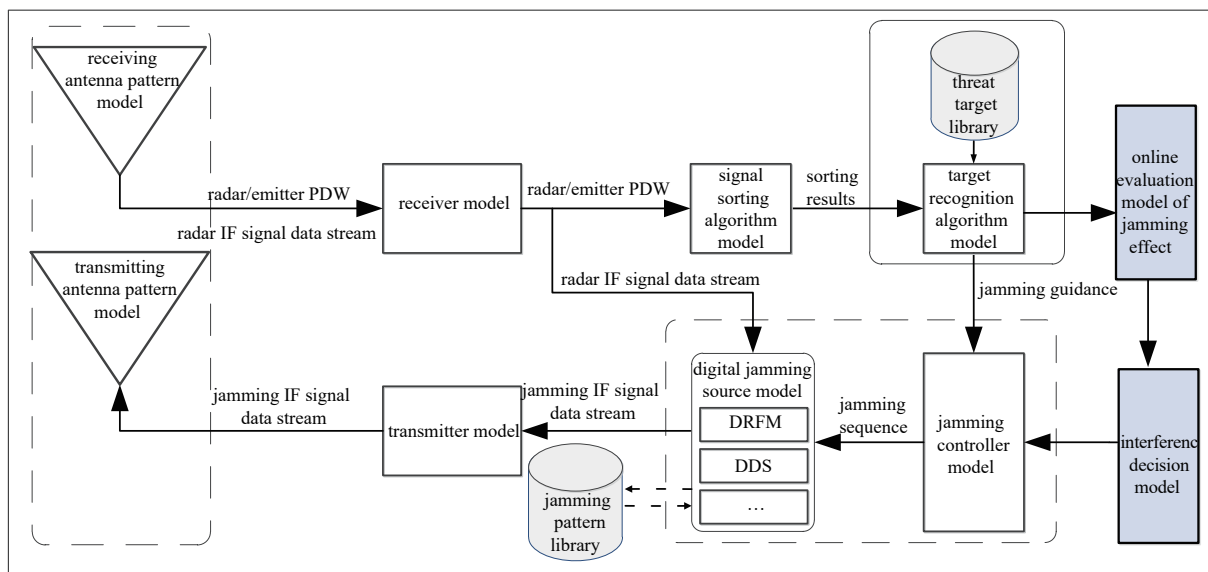


Fig.5 Logical composition diagram of cognitive countermeasure equipment model
图 5 认知对抗装备模型逻辑组成图

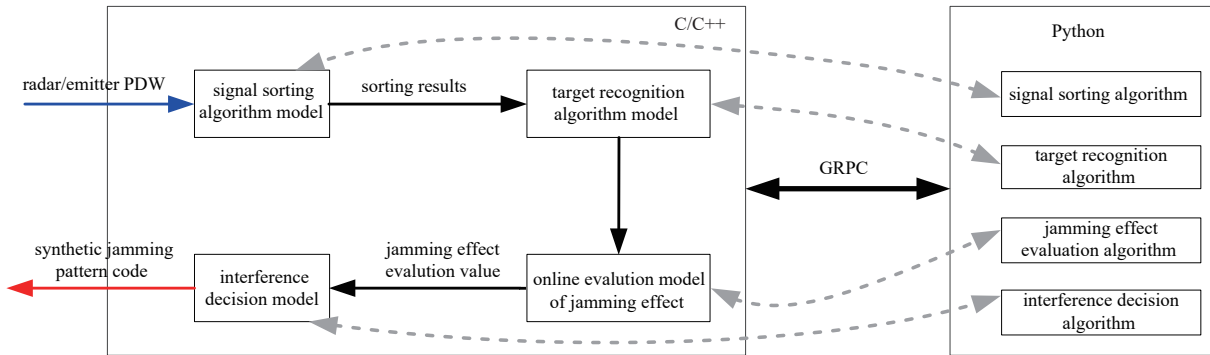


Fig.6 Cross language joint program framework of cognitive countermeasure equipment model
图6 认知对抗装备模型的跨语言联合程序框架

当 Python 版的相关算法性能满足预设指标要求后，就可以利用系统提供的深度学习在线推理加速组件，将该算法的推理模型“翻译”为基于 C/C++ 语言的版本，然后将 C/C++ 版的算法模型嵌入到认知对抗装备模型的 C/C++ 主体功能框架中，通过开展面向实战场景的对抗仿真试验，实现对认知对抗装备整机数字模型的一体化集成测试和装备能力的仿真评估。

2 系统应用实例

现代信息化战争条件下，战场电磁环境复杂性主要体现在两个方面，一是电磁信号密集程度高，频率范围宽，信号交叠严重；二是新体制雷达不断出现，信号参数复杂多变，而且各种参数都可能以不同规律变化。面对日益复杂的战场电磁环境，传统的雷达信号分选方法面临严峻挑战，增批、漏批现象屡见不鲜。如何在现有技术基础上开展创新性研究，通过机器学习方法与传统方法的结合，探索发现新方法、新途径，有效提高威胁辐射源分选识别的准确率，是信号分选智能算法研究的关键所在。机器学习中，有监督学习和半监督学习要求的训练数据是有标注的数据，而用于无监督学习（如常见的聚类算法）的训练数据则无需标注。这里根据基于无监督深度聚类的信号分选算法研究需求，利用本系统设置多种仿真场景（如图 7 所示）并驱动仿真系统运行，可以生成在时域、空域、频域、能量域不同交叠情况的雷达辐射源信号全脉冲数据，为智能算法提供各种分选难度的训练测试数据集。图 7 所示仿真场景中的 6 个机载雷达辐射源信号波形参数如表 1 所示，仿真生成的全脉冲数据如图 8 所示。图中 PA 表示脉冲幅度(Pulse Amplitude)。

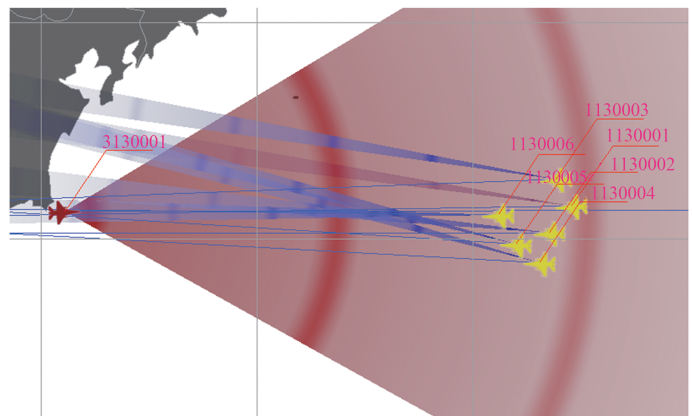


Fig.7 Simulation scenario of electromagnetic data
图7 电磁数据仿真场景

表1 雷达辐射源信号波形参数
Table1 Signal waveform parameters of radar emitter

emitter order number	RF/MHz	PW/ μ s	PRF/ μ s
1	9 500 \pm 150	1.00	7,9,11,15,17
2	9 310-9 590	1.00	13,15,17,19,21,23,25
3	9 450 \pm 150	1.10	50 \pm 5
4	9 270-9 630	1.20	45 \pm 4.5
5	9 600 \pm 150	1.25	60 \pm 9
6	9 450-9 710	1.20	60 \pm 12

3 结论

面向认知对抗的学习训练与仿真评估系统采用全数字仿真技术，通过建立认知电子战装备及其典型作战对象的信号级精细化模型，以及模拟电子战装备与作战对象在复杂电磁环境下的信息交互过程，开展基于仿真场景推演的博弈对抗动态仿真试验及试验结果分析，为认知电子战系统方案论证、关键技术研究等，提供智能算法模型训练、装备作战能力仿真试验评估手段。

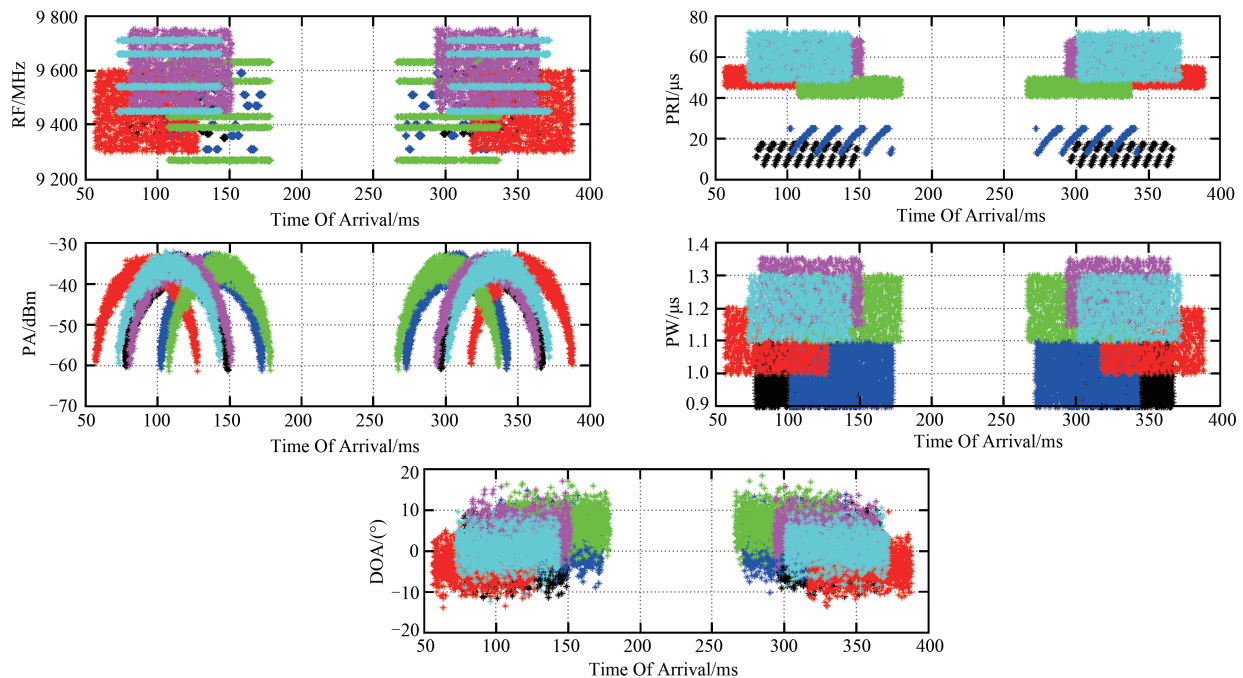


Fig.8 Visual display of full pulse data generated by simulation

图8 仿真生成的全脉冲数据可视化展示

参考文献：

- [1] 王沙飞,鲍雁飞,李岩. 认知电子战体系结构与技术[J]. 中国科学:信息科学, 2018,48(12):1603–1613. (WANG Shafei,BAO Yanfei,LI Yan. The architecture and technology of cognitive electronic warfare[J]. SCIENTIA SINICA Informationis,2018, 48(12): 1603–1613.)
- [2] 黄高明,应涛,王雪宝. 认知电子战——应对新型威胁的电磁利器[J]. 电子对抗, 2019(4):1–11. (HUANG Gaoming,YING Tao, WANG Xuebao. Cognitive electronic warfare—electromagnetic weapon to deal with new threats[J]. Electronic Warfare, 2019(4):1–11.)
- [3] 赵耀东,顾杰,易正红,等. 认知电子战的思考与理解[J]. 电子对抗, 2019(4):22–32. (ZHAO Yaodong,GU Jie,YI Zhenghong,et al. Thinking and understanding of cognitive electronic warfare[J]. Electronic Warfare, 2019(4):22–32.)
- [4] 陈冀,王宁,孟晋丽,等. 认知雷达对抗体系研究[J]. 现代雷达, 2017,39(9):81–85. (CHEN Ji,WANG Ning,MENG Jinli,et al. A study on cognitive radar electronic war system[J]. Modern Radar, 2017,39(9):81–85.)
- [5] 程嗣怡,徐宇恒,王星,等. 机载认知电子战系统构想及关键技术探析[J]. 电子对抗, 2020(3):8–14. (CHENG Siyi,XU Yuheng, WANG Xing,et al. Conception and key technology of airborne cognitive EW system[J]. Electronic Warfare, 2020(3):8–14.)
- [6] 杨红娃. 认知电子战系统概述[J]. 电子对抗, 2019(4):34–43. (YANG Hongwa. Overview of cognitive EW system[J]. Electronic Warfare, 2019(4):34–43.)
- [7] 周华吉,张春磊. 认知电子战系统组成及实现途径探究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017,12(5):448–451. (ZHOU Huaji,ZHANG Chunlei. Research on the composition and realization of cognitive electronic warfare system[J]. Journal of CAETT, 2017,12(5):448–451.)
- [8] 李岩,高梅国,崔双洋. 认知雷达对抗中的未知雷达状态识别方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(2):233–238. (LI Yan,GAO Meiguo,CUI Shuangyang. Unknown radar state recognition method for cognitive radar countermeasure[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(2):233–238.)

作者简介：

安 红(1968–),女,研究员,主要从事系统建模与仿真研究工作 .email:liyappleand@163.com.

高由兵(1982–),男,高级工程师,主要从事人工智能算法研究工作

张 朔(1990–),男,工程师,主要从事系统建模与仿真研究工作

杨 莉(1980–),女,高级工程师,主要从事系统建模与仿真研究工作

赵耀东(1986–),男,高级工程师,主要从事人工智能算法研究工作