

环境试验与评价

电磁环境适应性试验仿真系统研究

孟海锋, 熊学明, 张琪

(63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: **目的** 基于三维 GIS (地理信息系统) 构建一套仿真系统, 模拟不同作战场景下电磁环境 (侦察、探测、干扰、通信、导航等) 对武器装备造成的影响, 实现电磁环境适应性试验的仿真需求。**方法** 以 GIS 系统和电磁传播算法为基础, 以模型管理、想定规划、仿真推演、态势显示和模型数据库为主要框架, 提出电磁环境适应性试验仿真系统的基本结构, 论述系统各个模块的详细设计方法。**结果** 用图形、动画以及分析报告等多种可视化方法展现战场电磁态势, 实现了电磁环境适应性试验的数字化仿真模拟。**结论** 系统的设计思路和方法切实可行, 可以应用于试验、训练和推演等方面, 具有一定的研究价值和应用前景。

关键词: 电磁传播仿真; 电磁态势; 仿真推演

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)02-0031-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.02.006

Simulation System of the Electromagnetic Environment Adaptation Test

MENG Hai-feng, XIONG Xue-ming, ZHANG Qi

(63870 PLA troops, Huayin 714200, China)

ABSTRACT: In order to build a set of simulation system based on three-dimensional geographic information system (GIS) to simulate the impact of electromagnetic environment (reconnaissance, detection, interference, communication, navigation, etc.) on weapon equipment in different combat scenarios, and to realize the simulation requirements of electromagnetic environment adaptability test. Based on geographic information system and electromagnetic propagation algorithm, with model management, scenario planning, simulation deduction, situation display and model database as the main framework, the basic structure of electromagnetic environment adaptability test simulation system is proposed, and the detailed design method of each module of the system is discussed. The battlefield electromagnetic situation is visualized by graphics, animation and analysis report, and the digital simulation of electromagnetic environment adaptability test is realized. The design ideas and methods of the system are feasible and can be used in experiments, training and deduction, which has certain research value and application prospect.

KEY WORDS: electromagnetic propagation simulation; electromagnetic situation; simulation deduction

电磁环境适应性试验主要是指通过试验的方式掌握电磁环境因素对装备正常发挥其功能的影响程

度, 是目前武器装备试验领域的重点和难点问题。电磁环境适应性体现了装备对电磁环境的适应能

收稿日期: 2020-10-27; 修订日期: 2020-11-09

Received: 2020-10-27; Revised: 2020-11-09

基金项目: 军内重点科研项目 (012016018200A22301)

Fund: Military Key Scientific Research (012016018200A22301)

作者简介: 孟海锋 (1983—), 男, 工程师, 主要研究方向为电子对抗。

Biography: MENG Hai-feng (1983—), Male, Engineer, Research focus: electronic countermeasure.

引文格式: 孟海锋, 熊学明, 张琪. 电磁环境适应性试验仿真系统研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 031-036.

MENG Hai-feng, XIONG Xue-ming, ZHANG Qi. Simulation System of the Electromagnetic Environment Adaptation Test [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(2): 031-036.

力,也反映出电磁环境对装备的功能、战技指标及作战效能的影响程度。国内对电磁环境适应性试验仿真的研究起步较晚,目前来看研究电磁可视化的文献比较多,如文献[1-3],构建了电磁环境适应性试验仿真系统,但还没有成系统成体系的方案。文中研究了电磁环境适应性试验仿真系统,运用数字仿真的方式,通过计算机进行战场复杂电磁环境建模、想定设计和仿真推演,对战场上的各种电磁信号从频率、功率和覆盖范围等参数进行解算。再与

装备轨迹、敏感特性等数据进行分析,得到装备的电磁环境适应性数据,为装备电磁环境适应性试验方法和能力形成奠定基础。

1 系统设计

电磁环境适应性试验仿真系统由模型管理、想定规划、仿真推演、态势显示和仿真模型数据库五大模块构成,系统组成如图1所示。

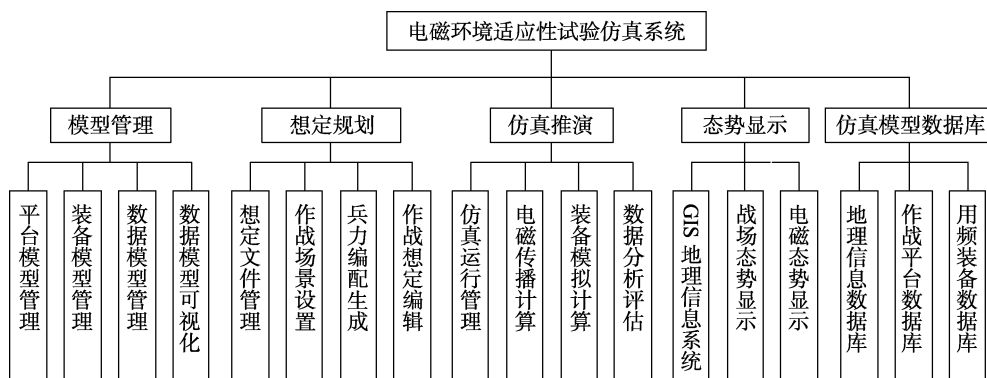


图1 系统组成

Fig.1 System components

模型管理模块主要用于对模型数据库中各类模型的管理和展示,包括各类作战平台、用频装备、天线方向图数据和目标 RCS 数据等。想定规划模块主要将作战计划转化为计算机想定,完成作战场景的区域、气象环境等设置,实现兵力编制构成、兵力部署、用频装备配置、作战任务设置等操作,并生成想定文件供仿真推演模块使用。仿真推演模块根据想定文件加载运行相应的仿真模型,基于时间推进和事件触发的仿真驱动机制,推进作战仿真过程,完成电波传播、作战装备性能参数、电磁环境复杂度等仿真计算。态势显示模块用于作战想定规划及作战仿真推演阶段的作战态势显示,包括战场平台部署/运动态势、作战任务过程、电磁覆盖情况、装备作用范围等。仿真模型数据库主要为仿真提供相关数据/模型支撑,包括 GIS 数据库、武器平台数据库、用频装备数据库、特性度数据等。

通常用于解决不同传播条件下的问题,即使多个传播模型可以用于解决同样的电波传播问题,但它们通常具有求解方式、求解难度以及求解精度上的差异,为指定的电波传播问题选择合适的传播模型,将能够提高问题求解过程的实时性和计算结果的准确性。因此,电波传播模型自动匹配是系统实现的关键问题之一。

2.1.1 电磁传播模型分类

按照模型与传播条件的吻合程度,将所有可用的模型分为三类:确切描述模型、近似求解模型和理论估算模型。其使用条件如图2所示。



图2 可用的电波传播模型分类

Fig.2 Classification of available radio propagation models

2 分系统设计

2.1 电磁传播计算模型

虽然“电磁传播计算”只是“仿真推演”模块的子模块,但仿真系统的核心就是算法,电磁环境适应性试验仿真系统的核心就是电磁传播算法,这里单独列出阐述。电磁传播算法从适用的场景、频率等因素分为很多种,如 ITM、PE 抛物方程模型、ITU 算法簇等。在电磁传播算法的选择上,不同的电波传播模型

从确切描述模型、近似求解模型到理论估算模型,模型与指定传播条件的吻合程度越来越低,期望的求解精度也就越来越低,但计算量的大小依赖于选择模型的自身特点。在不考虑计算实时性的条件下,计算精度越高越好。因此,传播模型选择的总原则是:首先选择确切描述模型,其次是近似求解模型,最后

才是理论估算模型。

2.1.2 电波传播模型自动匹配方法

首先，对所有的检索词参数进行分级，共分为 3 级：一级检索词参数包括频率、发射天线高度、接收天线高度和传播路径类型；二级检索词参数包括地表参数、对流层参数和电离层折射率梯度；三级检索词参数包括时间百分比、传播距离、求解类型和已知参数类型。其次，按顺序，将检索词与已知传播模型进行匹配，如果所有检索词参数都得到满足，即匹配，则该模型作为确切描述模型。如果一级和二级检索词参数得到满足，而三级检索词参数没有满足，称该模型为在此检索词下的一类近似求解模型。此时可以通过对求解结果进行经验性补偿，提高求解精度。如果一级检索词参数得到满足，而二级检索词参数没有完全被满足，称该模型为在此检索词下的二类近似求解模型。此时，需要对求解结果进行较大动态范围的补偿，而且结果的误差可能会很大。如果一级检索词参数没有被满足，则称该模型在此检索词下不匹配，利用理论估算模型进行求解。传播模型选择流程如图 3 所示：

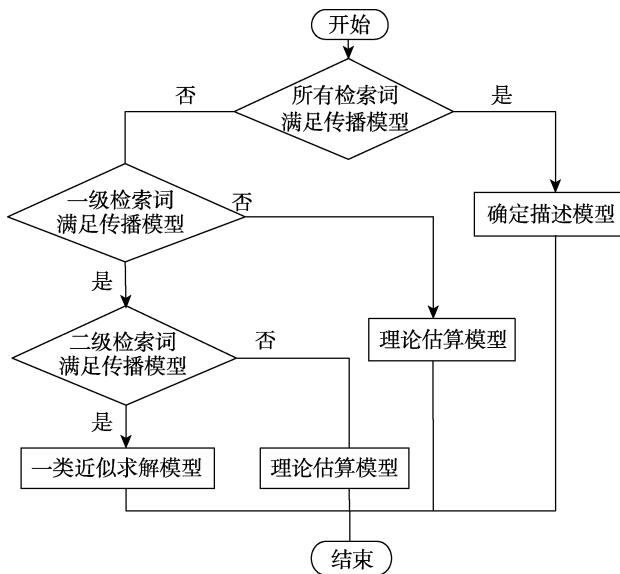


图 3 传播模型选择流程
Fig.3 Flow chart of propagation model selection

2.2 模型管理

模型管理模块主要是武器装备平台模型、数据模型和数据可视化等功能的管理。装备平台模型可以通过 3dmax、CAD、C4D 等软件建模，导入系统。数据模型主要是一些武器装备的属性数据，比如天线的方向图数据、目标 RCS 数据等，这些数据要通过暗室测试或者仿真（HFSS/FEKO 等软件）来获取。数据可视化则是对模型数据的可视化显示，可用的技术或控件比较多，如 OpenGL/Direct3D、anycad 等，一般

采用三维可视化，可以方便从各个方向观察数据。

模型文件一般分为实体模型和组件模型两大类。实体模型指可用于兵力部署的各类作战平台模型，包括导弹模型、固定节点、海基平台、空基平台、陆基平台和天基平台，主要是为了各设备搭载配置和作战关系组网提供资源，方便整体作战体系下的管理控制。组件模型指可为作战平台搭载的相关设备模型，包括电子干扰设备、电子侦察设备、雷达导引头、雷达设备、通信设备、武器装备、天线等，主要是具体设备参数和数据^[4]。

由于仿真系统是针对电磁环境，其模型准确度主要涉及功率、频率、接收机性能等属性参数。常用属性参数见表 1。

表 1 常用设备参数
Tab.1 Common equipment parameters

模型	参数
天线	方向图数据、直径、波束宽度、最大增益、频率、天线效率等
通信发射机	开关机、发射功率、频率、信号带宽、馈线损耗等
通信接收机	开关机、中心频率、带宽、馈线损耗、噪声系数和噪声功率等
雷达设备	雷达开（关）机、峰值功率、频率、接收机带宽、典型目标 RCS、单个脉冲检测 SNR 门限、虚警概率、脉冲积累数、脉冲宽度、最大探测距离、接收机噪声系数、噪声温度、噪声带宽、系统综合损耗、俯仰面起始角、俯仰面终止角、方位面起始角、方位面终止角、距离测量误差方差、方位角测量误差方差、俯仰角测量误差方差等
电子干扰	开（关）机、干扰持续时间、发射功率、频率、带宽和发射综合损耗、天线增益、高度、方向图姿态、方向图数据文件、方向图显示和缩放比例、跳频预测干扰、梳状干扰和宽带阻塞干扰等

2.3 想定规划

想定规划模块在仿真模型数据库提供的模型/数据支撑下，完成作战场景设置、作战兵力部署、作战任务规划等想定编辑工作，并生成想定文件，供仿真推演模块调用。根据不同场景编辑想定，在数字地图上部署相关作战平台，配置其基本属性和运动轨迹，挂载相关装备^[5-6]，设置作战任务，并生成想定文件。其过程一般有以下几个方面。

1) 作战区域设置。选定作战发生的区域范围，设置作战自然环境，按照战场发生的时间和地点，依托高精度的 GIS 系统，自动匹配作战区域的地形。

2) 气象条件设置。支持地理气候类型选择及参

数设置,进行平均表面环境温度、平均表面相对温度、年均单点降雨量、雨区范围、空气温度、海面温度等参数的设置。

3) 背景电磁设置。配置作战区域内的背景电磁噪声,包含新建电磁计算区域、删除电磁计算区域和配置区域电磁噪声。其中电磁区域类型包括矩形、圆形和多边形。电磁噪声参数包括起始频率、终止频率、所在作战阶段、背景电磁环境。

4) 兵力编配生成。设置部署的兵力属于哪一作战势力,作战势力可添加不同作战单元类型。

5) 作战网系构建模块。根据联合作战任务具体方案,调用作战力量编配模块生成的作战平台,建立网系节点,并设置节点间收发关系。

6) 作战想定设计。对单一作战实体和作战过程的流程设计。对于单一实体来说,其流程设计包括作战任务的设定和行动路径规划。对于整个作战流程设计来说,首先要统筹作战阶段,设置各个作战阶段的起始时间和终止时间,设定参与该阶段作战的作战单元、作战平台和用频装备,设置其运行状态,然后划分作战区域,从而完成作战预案向计算机仿真想定的转换。

2.4 仿真推演

仿真推演模块从功能上主要分为仿真运行管理

模块和仿真模型解算模块。其中,仿真运行管理包括仿真控制和仿真推演工作台,完成想定文件读取、仿真开始/暂停/重置、仿真速度控制、仿真送显^[7-8],以及空间分析/雷达计算/通信计算/干扰分析等参数设置等功能。仿真模型解算包括仿真模型加载、仿真数据解算和仿真效果驱动^[9-10]等功能,并提供大量算法模型,包括电波传播算法模型、装备模拟计算算法模型、电磁环境计算算法等。仿真运行管理能够控制仿真开始、重置、暂停、终止;能够根据仿真想定文件设置仿真终止条件;能够通过已完成的百分比及预计剩余时间显示仿真进度;能够将仿真时间作为仿真终止条件;能够在仿真中调整仿真推进时间步长;能够调整仿真速度加速运行。

仿真运行一般采用变时间步长的时间推进与基于离散事件推进的仿真推进机制。事件触发机制是在给定仿真时间粒度的前提下,在每一个时间步长都对仿真进行一次判别,一旦满足了触发条件,则该实体执行对应的作战任务。所有触发条件和作战任务可以通过界面在仿真开始之前配置好,形成推演规则。部分作战规则在模型创建之初通过消息机制来设定或有用户指控界面发出消息来控制。离散事件类型包括时间触发、地域触发、实体探测、消息接收和实体状态变化,如图4所示。

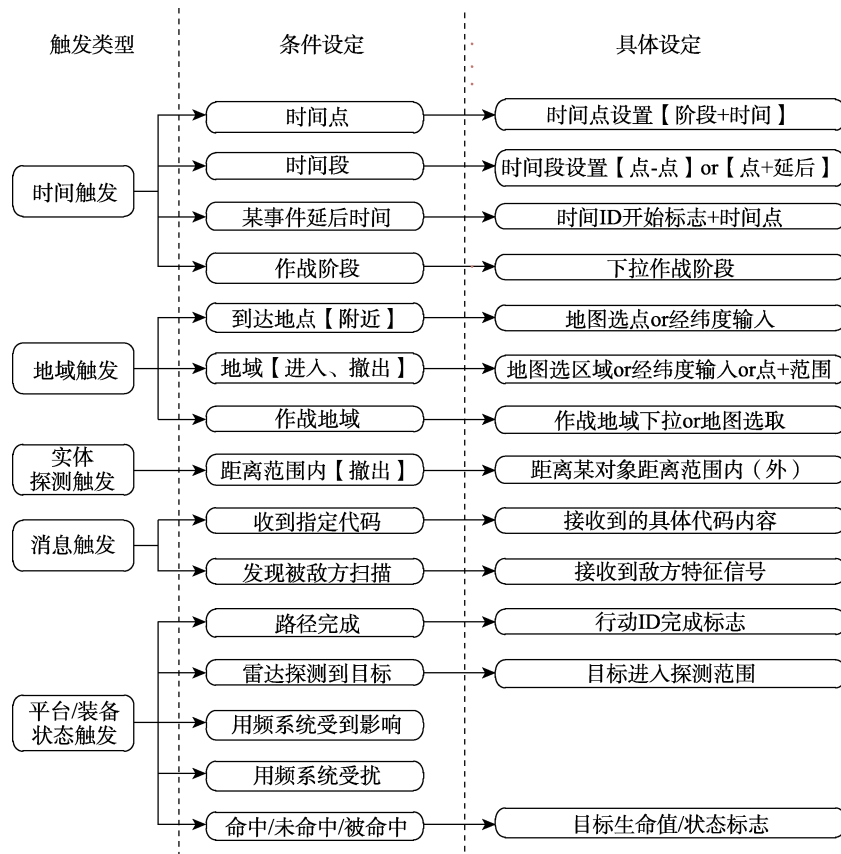


图4 仿真推进种类
Fig.4 Simulation deduction subsystem

2.5 态势显示

态势显示模块主要实现在仿真过程中接收仿真数据，对仿真过程进行实时显示和监控。可对矢量地图数据、DEM 数据及影像数据进行处理，生成可视化的三维立体地形，可在三维地形上进行常规地形量算，并将量算结果展现在三维地形上。同时，在三维地形上对作战相关的询问应答波束、干扰波束、信号传输、预警探测引导波束和范围、指挥引导波束、数据链和通信电台通信波束、雷达探测波束和范围等进行可视化显示^[11-14]，支持按照时间和频率筛选电磁分布数据，并进行电磁态势分析。可通过 UDP、TCP、RTI 等多种外部交互方式从外部获取相关驱动数据，驱动展现效果的动态变化。

2.6 仿真模型数据库

GIS 数据库主要用来存储地理信息平台应用的高程数据、影像数据和矢量数据。武器装备三维模型数据库包含丰富的军事电子信息系统和武器装备三维模型。天线模型库一般支持导入仿真、测试的天线

方向图文件，通过天线主瓣波束宽度、增益以及副瓣电平定义方向图，通过参数定义的阵列天线。

3 总体结构

电磁环境适应性试验仿真系统的总体结构、模块划分、数据流向如图 5 所示。系统以仿真模型数据库的 GIS 数据为基础，搭建二、三维 GIS 可视化平台，与模型管理模块进行数据交换，实现武器装备模型的实体化，为想定规划模块提供基础作战单元模型的支撑。想定规划模块依托 GIS 可视化平台和作战计划制定想定文件，供仿真推演模块调用。仿真推演模块根据想定文件中的装备基本属性、挂载的组件装备、运行轨迹和作战任务，调用仿真模型数据库里的装备数据，运用适合场景的电磁传播算法，进行覆盖范围、电子对抗、复杂度等推演计算。模型管理模块中的可视化数据、想定规划模块中作战计划数据、仿真推演模块中的推演计算结果数据都在态势显示模块中以作战态势、电磁态势、数据图表等显示方式呈现。

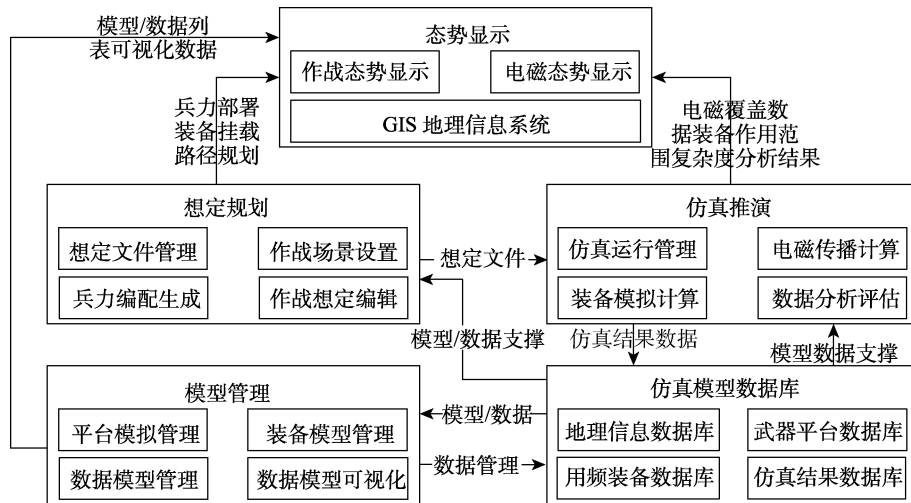


图 5 系统总体结构
Fig.5 System overall mechanics

4 仿真案例

场景模拟红方无人机按照预定航线向蓝方阵地飞行，搜寻探测目标雷达站并进行攻击。在此过程中，蓝方所有用频设备（搜索雷达、跟踪雷达、干扰装备、通信装备等）均处于工作状态。当红方无人机飞行至蓝方防空识别区内，并被蓝方雷达成功探测到时，蓝方干扰机开始对红方无人机进行干扰^[15-16]。红方无人机导引头和导航系统受干扰后自身航线将发生偏移，对目标的测向定位也会失准。

按照模拟的场景建立模型、设置参数、构建想定，进行推演仿真，如图 6 所示。无人机按预设轨迹飞行，并将导航、侦察、攻击等状态信息实时发送给无人机



图 6 无人机对地攻击案例
Fig.6 Case of UAV attack on the ground

测控中心。当无人机进入蓝方防空范围,并被蓝方预警机/雷达站探测到后,蓝方干扰机开始对无人机实施导航干扰和雷达干扰,无人机的航迹发生偏移,场景中通信链路性能、雷达探测覆盖范围、电磁环境复杂度等可通过统计分析模块予以显示。无人机的电磁环境适应性可以通过敏感特性数据和计算得到的无人机所处电磁环境对比分析得到。

5 结语

电磁环境适应性试验仿真系统涉及GIS、模型绘制、电磁传播算法、态势显示、数据库应用、分析评估等专业方向,是一个复杂系统。从仿真案例看,文中设计思路和方法切实可行,可以应用于试验、训练和推演等方面,具有一定的研究价值和应用前景。需要说明的是,仿真都是在一定想定场景下进行,得出的电磁环境适应性是局限的,仅能说明仿真场景下武器装备的电磁环境适应性,可以在想定中增加不同类型辐射源来提高仿真适应性的覆盖度。

参考文献:

- [1] 郭淑霞,周士军,高颖,等.复杂战场电磁环境建模与电磁态势可视化技术[J].西北工业大学学报,2015,33(3):406-412.
GUO Shu-xia, ZHOU Shi-jun, GAO Yin, et al. Complex battlefield electromagnetic environment modeling and electromagnetic situation visualization[J]. Journal of Northwestern Polytechnic University, 2015, 33(3): 406-412.
- [2] 龚铮.弹舰电子对抗的视景仿真技术研究与应用[D].西安:西北工业大学,2007.
GONG Zheng. Research and application of visual simulation technology of ecm between antiship missile and ship [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [3] 唐洋.复杂电磁环境三维态势可视化软件的研究[D].南京:南京理工大学,2015.
TANG Yang. Research on 3D situation visualization software of complex electromagnetic environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [4] 陈充泽.基于本体的三维模型管理框架的研究与应用[D].上海:上海交通大学,2015.
CHEN Yun-ze. Research and application on ontology-based 3D model management framework[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [5] 李晨,柏彦奇,史宪铭.军事仿真想定生成问题研究[J].指挥控制与仿真,2017,39(6):77-81.
LI Chen, BO Yan-qi, SHI Xian-ming. Overview on military simulation scenario generation[J]. Command control and simulation, 2017, 39(6): 77-81.
- [6] 刘春宏.战场复杂电磁环境仿真想定规划技术研究[J].通信对抗,2017,36(3):46-50.
LIU Chun-hong. Study on planning technology of complex electromagnetic environment simulation scenario[J]. Communication countermeasures, 2017, 36(3): 46-50.
- [7] 刘水泉,李增路,张长泉,等.战术辅助决策系统中的兵力编配估计模型研究[J].系统仿真学报,2011,23(6):1292-1296.
LIU Shui-quan, LI Zeng-lu, ZHANG Chang-quan, et al. Combat disposition assessment in tactical decision aiding system[J]. Journal of system simulation, 2011, 23(6): 1292-1296.
- [8] 段瀚林.并行FDTD算法实现及在海面电波损耗仿真中的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
DUAN Han-lin. Implementation of parallel FDTD algorithm and its application in simulation of em wave loss on sea surface[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [9] 斯中毅.基于仿真推演的实时辅助决策态势评估机制研究[J].计算机与数字工程,2016,44(11):2179-2183.
SI Zhong-yi. Situation assessment method of real-time assistant decision-making based on simulation[J]. Computer and digital engineering, 2016, 44(11): 2179-2183.
- [10] 张阳,司光亚,王艳正.面向联合作战的网电对抗态势可视化系统设计与实现[J].郑州大学学报,2018,39(5):45-51.
ZHANG Yang, SI Guang-ya, WANG Yan-zheng. Design and implementation of cyberspace war situation visualization system for joint operations[J]. Journal of Zhenzhou University, 2018, 39(5): 45-51.
- [11] 张晨.面向陆军仿真的实验评估系统设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2015.
ZHANG Chen. Design and implementation of experimental evaluation system for army simulation[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [12] 陈蕾.深空探测三维实时可视化模型创建与管理研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.
CHEN Lei. Study on real-time 3D modeling and management in deep space exploration[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University Master of Science dissertation, 2017.
- [13] 申军岭,徐海,齐兆龙.雷达抗反辐射攻击诱饵布站使用作战仿真[J].火力与指挥控制,2018,43(11):151-160.
SHEN Jun-lin, XU Hai, QI Zhao-long. Research on warfare simulation for embattling of radar decoy antagonizing anti-radiation weapon system[J]. Fire control and command control, 2018, 43(11): 151-160.
- [14] 陈彬,王全民,龚建兴,等.作战模拟态势显示中的通用性技术研究[J].国防科技大学学报,2009,31(6):115-120.
CHEN Bin, WANG Quan-min, GONG Jian-xing, et al. Research on techniques to achieve general using of situation display in combating simulation[J]. Journal of National University of Defence Technology, 2009, 31(6): 115-120.
- [15] 何永喜.电子战无人机支援干扰战法推演[J].舰船电子对抗,2017,40(40):13-19.
HE Yong-xi. Tactics deduction of support jamming for EW UAV[J]. Shipboard electronic countermeasure, 2017, 40(40): 13-19.
- [16] 夏红梅,赵志军,张欣景.基于HLA的一体化战术训练仿真系统综合态势显示研究[J].舰船电子工程,2010,30(8):117-127.
XIA Hong-mei, ZHAO Zhi-jun, ZHANG Xin-jin. Research on synthesis situation display in integration tactical training simulation system based on HLA[J]. Ship electronic engineering, 2010, 30(8): 117-127.