文章编号：2095-4980(2026)01-0019-08

面向雷达数字仿真平台的组件化设计与重构方法

张楷煜，吴其华*，刘晓斌，徐志明，艾小锋，赵　锋

(国防科技大学 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室，湖南 长沙 410073)

摘　要：针对传统雷达数字仿真平台的功能耦合、性能低下等问题，创新性地融合面向对象编程和组件复用理念，提出一种组件化雷达仿真架构。通过将雷达数字仿真系统各功能抽象为独立组件，并采用信号-槽机制实现松耦合通信，使各个组件之间相互独立，提高了各组件间的可复用性。仿真验证表明，这种组件化的雷达数字仿真平台运行准确，显示正常，并具备优秀的适应性和可扩展性，能够满足多样化的仿真需求，为雷达系统开发提供了新的解决方案。

关键词：雷达数字仿真平台；组件化设计；场景编辑

中图分类号：TN957.51　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11805/TKYDA2024524

A component-based design and implementation method for radar digital simulation platform

ZHANG Kaiyu，WU Qihua*，LIU Xiaobin，XU Zhiming，AI Xiaofeng，ZHAO Feng

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

Abstract：In response to the issues of functional coupling and low performance in traditional radar digital simulation platforms, an innovative approach has been proposed by integrating the concepts of object-oriented programming and component reuse. This approach introduces a component-based radar simulation architecture. By abstracting the various functions of the radar digital simulation system into independent components and implementing loose coupling communication through a signal-slot mechanism, the components are made mutually independent, thereby enhancing the reusability among them. Simulation verification has demonstrated that this component-based radar digital simulation platform operates accurately, displays normally, and possesses excellent adaptability and scalability. It is capable of meeting diverse simulation requirements and offers a new solution for radar system development.

Keywords：radar digital simulation platform；component design；scene editing

目前，全球各国都对雷达数字仿真技术高度重视，利用数字仿真技术所设计的雷达系统，能够重复进行多次试验并节省各类资源[1-2]。近年来，随着计算机技术的不断发展，基于此的雷达数字仿真技术也相应地进步发展。

20世纪90年代之前，雷达数字仿真技术的设计思想大多为软件模块化，而软件模块化设计思想是面向过程的软件开发方法，其代码重用性差，缺乏抽象和封装且难以维护和扩展。20世纪90年代后，面向对象的软件设计思想逐渐应用到雷达数字仿真系统的开发上，组件化软件体系逐渐成为软件设计的主流，极大促进了代码和模型的可复用性。目前，国内的雷达数字仿真技术已取得了大量成果。文献[3]提出了面向雷达数字化设计与仿

收稿日期：2024-09-02；**修回日期：**2024-10-11

基金项目：国家自然科学基金资助项目(62071475)；湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40561)；国防科技大学科研资助项目(ZK22-46)

***通信作者：**吴其华　email:stevewool1990@outlook.com

引用格式：张楷煜,吴其华,刘晓斌,等. 面向雷达数字仿真平台的组件化设计与重构方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2026,24(1):19-26. DOI:10.11805/TKYDA2024524.

Citation format：ZHANG Kaiyu,WU Qihua,LIU Xiaobin,et al. A component-based design and implementation method for radar digital simulation platform[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2026,24(1):19-26. DOI:10.11805/TKYDA2024524.

真的仿真转台建模与仿真方法，全面对雷达仿真转台的运动属性进行了建模和描述。文献[4]设计了一种雷达抗干扰模拟训练系统，在构建系统体系架构的基础上，设计实现了训练场景编辑、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。以上设计都是基于Matlab开发的，其内部各模块之间功能耦合，代码冗余，当需要更新仿真系统的功能时，需对整个工程项目进行重新编译，耗时较长，整个系统的开发效率低下。

近年来，基于组件的软件工程(Compoment Based Software Engineering，CBSE)成为降低系统复杂度、构造智能化系统的有效方法[5-7]，许多学者基于该方法对雷达数字仿真系统进行了组件化设计。文献[8]提出一种面向信号级雷达模型的“通用基础框架+功能组件”设计方法，但并未实际验证具体体制雷达的仿真情况。文献[9]设计并验证了一种基于C++语言的雷达系统建模与仿真方法，显示了组件化设计在雷达仿真系统中的可行性和潜在优势。

针对传统雷达数字仿真平台的功能耦合、性能低下等问题，本文创新性地融合面向对象编程和组件复用理念，设计并实现了战情编辑、态势预览以及信号处理等多个组件，并根据雷达系统的工作顺序将其组装在一起，形成满足相应场景需求的雷达数字仿真平台。实验结果表明，各个组件之间具有良好的可复用性，降低了对雷达仿真系统的更新难度，为以后对功能复杂和不同平台的雷达仿真平台的实现奠定了良好的基础。

1 总体设计方案

雷达数字仿真平台的组件化设计与重构的核心主要有模块化架构设计、接口标准化、参数化建模3部分。模块化设计将雷达数字仿真平台分解为多个独立的功能模块，如信号生成、参数编辑、态势显示灯组件，各个组件独立开发、测试和更新，提高了平台的灵活性和可维护性；统一的接口规范使不同模块之间的数据交换和控制流程标准化，增强了平台的可扩展性；采用参数化方法描述雷达系统和环境特性，使仿真模型可灵活适应不同的场景和需求。

1.1 平台整体框架

组件化设计的核心思想是将软件系统分解为独立的、可重用的部分，这些部分被称为组件。每个组件都有明确定义的功能，可存储在库中，并可在不修改其他组件的情况下被添加或替换到应用程序中。按照该思想，本文将雷达数字仿真平台分为雷达系统设置及环境设置两大部分。其中雷达系统部分由发射机和信号处理组成；环境仿真部分由目标回波、目标运动、干扰和噪声组成，各功能组件按照雷达工作顺序通过标准输入输出接口链接成一个完整的雷达仿真平台，整个框架如图1所示。

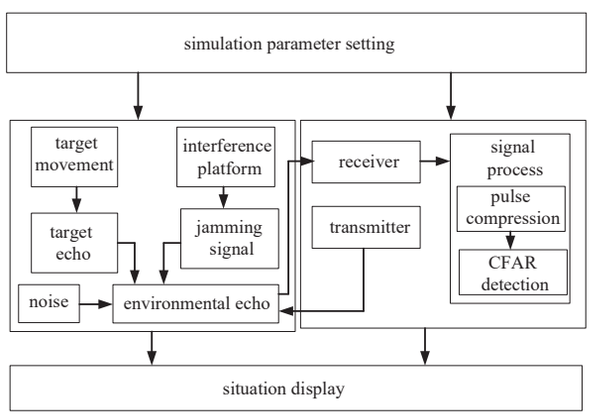

Fig.1 Design framework for radar digital smulation platform system
图1 雷达数字仿真平台系统设计框架

1.2 平台层次划分

现代雷达系统的设计是一个复杂的过程，若按照其工作流程对整个系统进行结构化设计开发，难度较大。本文依据分层和组件化设计思想对雷达数字仿真平台进行设计，将雷达数字仿真平台划分为功能组件层和算法模块层，大大降低了设计的复杂度。其中算法模块层是雷达仿真系统的基础，为功能组件层提供逻辑算法的支持；功能组件根据高内聚、低耦合的核心思想将雷达系统软件的功能进行划分，保证各功能组件间较低的耦合度。功能组件以算法模块层提供的算法为基础，实现其所需要的功能。平台层次划分如图2所示。

1.3 可重构雷达数字仿真平台设计

基于组件设计的雷达数字仿真平台是在设计出组件库的基础上，分析需求场景进而得到各个组件的工作顺序，并将组件按顺序装配所形成的。

以雷达对抗场景为例，分析其程序运行流程，如图3所示。首先设置雷达、目标、干扰机等相关参数，并将参数保存到数据库中；其次根据参数设置目标的运动状态并产生回波，之后对回波(干扰)信号进行处理得到目标运动参数；最后将其在态势显示组件中显示。

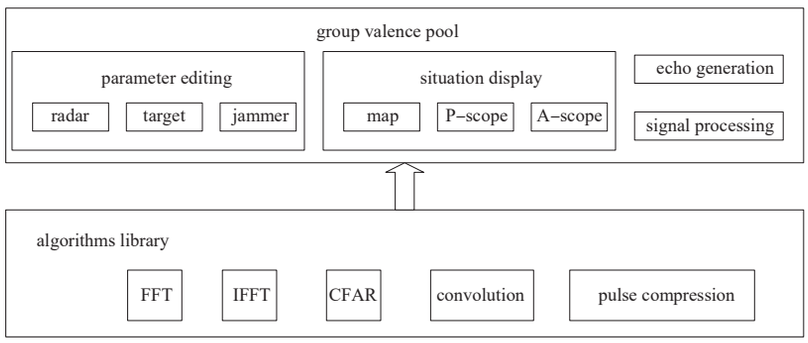

Fig.2 Hierarchical division of radar digital simulation platform system
图2 雷达数字仿真平台系统层次划分

2　组件化开发与实现

本平台的所有组件均通过C++实现。C++是一种编译型语言，生成的机器码可直接在硬件上运行，避免了Matlab解释执行的开销，可显著提升大规模仿真任务的性能。其通过精细的内存控制和自定义分配策略，在处理大规模数据时大幅降低了内存占用，使平台在长时间运行和资源密集型场景中表现卓越。相比Matlab实现，C++实现仿真平台不仅运行速度更快，同时更有效地利用了系统资源，为大规模仿真研究提供了更高效、可靠的工具。

2.1 参数编辑组件类

参数编辑组件由雷达参数编辑、目标参数编辑和干扰机参数编辑3个子组件构成。每个子组件与数据库中的相应表建立一一对应的关系，从而实现数据的高效组织和持久化存储。在组件设计中，采用单例模式实现这些组件类。单例模式作为一种创建型设计模式，确保每个组件类仅有1个实例，并提供1个全局访问点。这种设计不仅优化了资源的利用效率，还确保了数据的一致性和完整性。通过单例模式的应用，本组件类实现了对共享数据的集中管理，提升了系统的可维护性和稳定性。

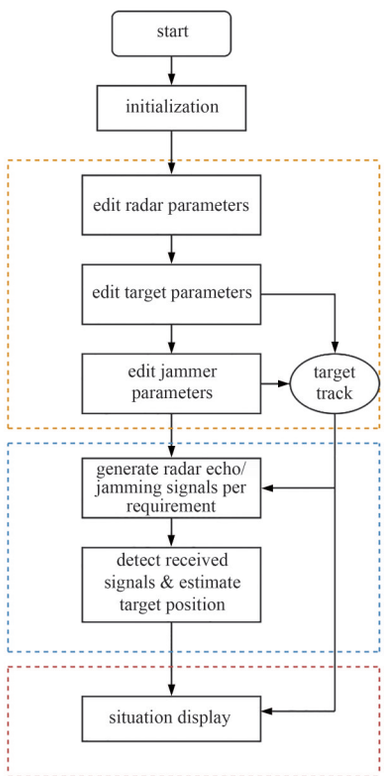

Fig.3 Flowchart of radar digital simulation platform operation
图3 雷达数字仿真平台运行流程图

1) 雷达参数编辑组件

组件输入：雷达配置参数；组件功能：将雷达配置参数保存在数据库的雷达表中，同时具有删除、清空及修改数据的功能。该组件检验输入的参数是否合法，如不合法，则无法保存配置参数。

2) 目标参数编辑组件

组件输入：目标配置参数；组件功能：将目标配置参数保存在数据库的目标表中，同时具有删除、清空及修改数据的功能。该组件检验输入的参数是否合法，如不合法，则无法保存配置参数。目标参数主要包括雷达散射截面积(Radar Cross Section，RCS)均值、目标类型、运动类型、运动相关参数以及回波仿真方法。

3) 干扰机参数编辑组件

组件输入：干扰机配置参数；组件功能：将干扰机配置参数保存在数据库的干扰机表中，同时具有删除、清空及修改数据的功能。该组件检验输入的参数是否合法，如不合法，则无法保存配置参数。

2.2 回波生成与信号处理组件类

信号发生与处理组件由回波生成、信号处理、干扰生成以及目标检测4个组件构成。图4为运行流程图，展现了信号发生与处理的实现逻辑以及信号在雷达系统中的处理流程。

1) 回波信号生成组件

组件输入：战情数据库、仿真参数；组件功能：生成目标运动航迹以及目标回波。仿真参数包括仿真方法、

仿真起始时间、仿真间隔、仿真终止时间以及RCS模型。该组件在处理点目标RCS模型时，主要考虑Swerling I~IV型以及固定型5种，生成的回波信号包括线性调频信号、相位编码信号等。

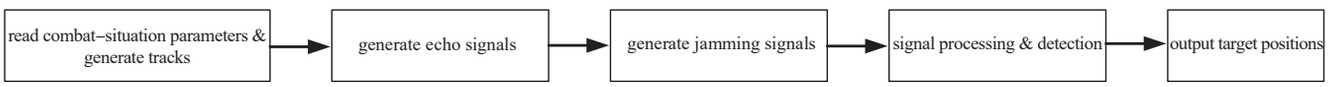

Fig.4 Echo signal generation and signal processing component flow
图4 回波信号生成与信号处理组件流程

为验证该模块的有效性，设置目标RCS起伏类型为Swerling I和Swerling III。调用相关组件生成回波信号，统计信号幅度分布并将其与Matlab生成的理论分布进行比较。结果如图5所示，仿真结果与理论曲线吻合较好，验证了RCS特征仿真的正确性。

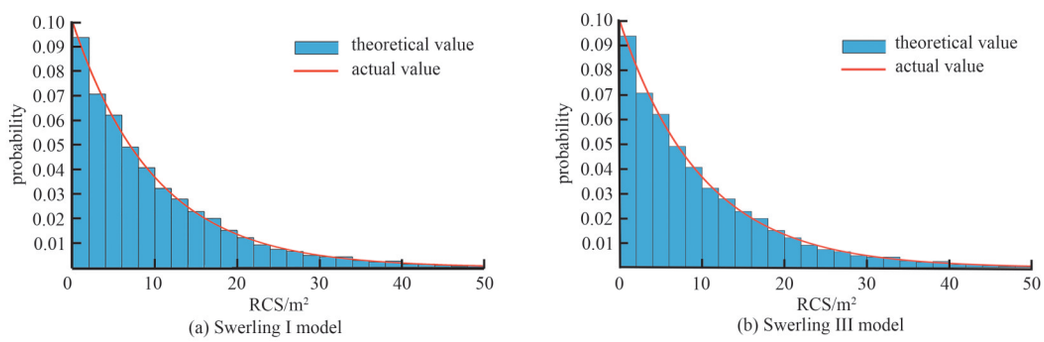

Fig.5 RCS feature simulation and comparison
图5 RCS特征仿真对比

2) 信号处理模块

模块输入：回波信号；模块功能：检测到目标位置。该组件接收回波，经匹配滤波和恒虚警率(Constant False-Alarm Rate，CFAR)检测后，测量目标距离参数。

为验证该模块的有效性，以线性调频信号为例，设置2个目标，与设定雷达的距离分别为60 km和150 km；然后调用相关组件生成回波信号并对其进行处理，并将处理后的信号显示到波形显示组件中。结果如图6所示，仿真结果与设置的参数相符合，验证了本模块的重要性。

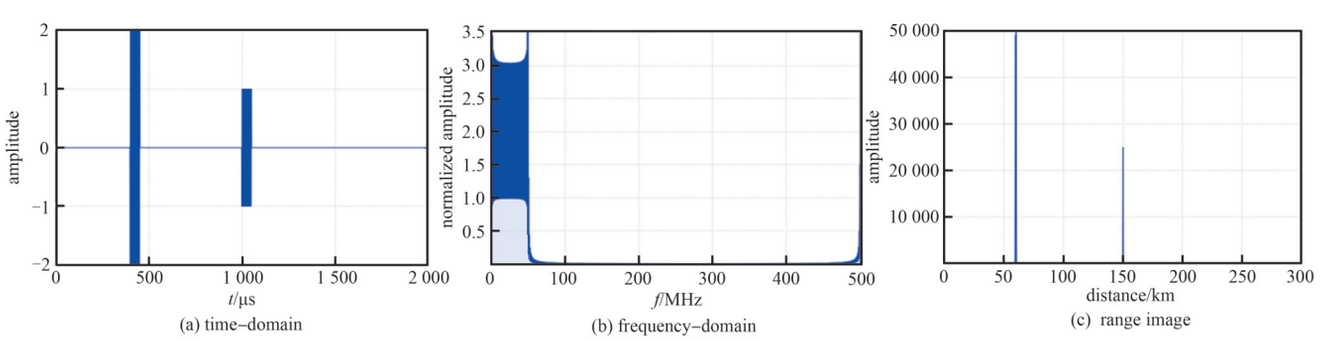

Fig.6 A-scope module of echo signal
图6 回波信号A显模块

3) 干扰生成模块

组件输入：参数数据库、航迹；组件功能：产生干扰信号。该组件读取干扰机参数并生成干扰信号，主要包含间歇采样转发干扰(Interrupted Sampling Repeater Jamming，ISRJ)和频谱弥散干扰(Smeared Spectrum，SMSP)两种，同时，该组件具有良好的可扩展性。

为验证该模块的有效性，以间歇采样转发干扰和频谱弥散干扰为例。设置相关参数，其中回波参数设置与上节相同，间歇采样频率设置为20 MHz，占空比设置为0.5，频谱弥散次数设置为4。调用相关组件生成信号，对信号进行匹配滤波，对比理论结果，并将处理后的信号显示到波形显示组件中。结果如图7所示，仿真结果与理论吻合较好，验证了干扰信号仿真的正确性。

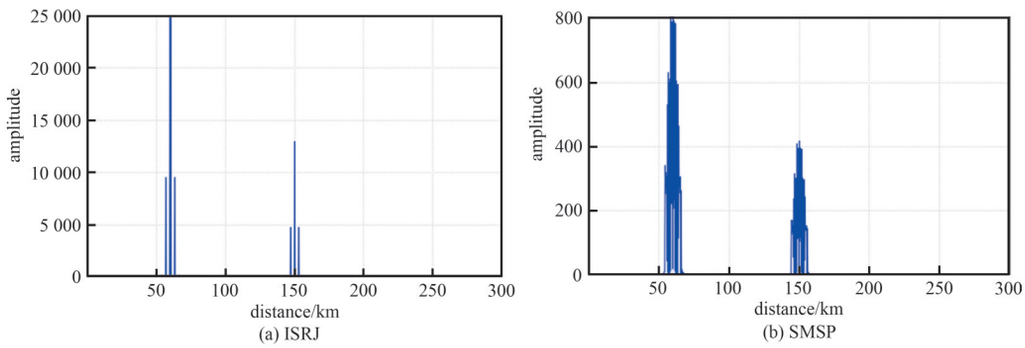

Fig.7 Pulse–compression output display of jamming signal
图7 干扰信号脉压输出显示

2.3 态势显示组件类

态势显示组件由地图组件、雷达P显组件两部分组成，用于将目标航迹显示到地图上，并将雷达探测到的信息显示到界面上。

1) 地图组件

组件输入：战情数据库、航迹/弹道；组件功能：实时显示设置的雷达位置及目标航迹/弹道。干扰机航组件输入：战情数据库、航迹/弹道；组件功能：实时显示设置的雷达位置以及目标航迹/弹道、干扰机航迹。该地图组件包括在线地图和内网离线地图两种模式，同时可在街道图和卫星图之间切换。

在雷达数字仿真平台中设置一个目标，生成航迹文件，文件包含不同时刻目标的地理坐标系(Geographic Coordinate System，GSC)下坐标信息以及地心地固坐标系(Earth–Centered, Earth–Fixed，ECEF)下坐标信息，地图组件读取该文件后，将航迹可视化呈现在地图上。图8为目标设置为飞机，运动方式为匀速直线运动，经度设置为(115°, 114.5°)，纬度设置为(43.5°, 44°)，高度设置为1 000 m的地图航迹。

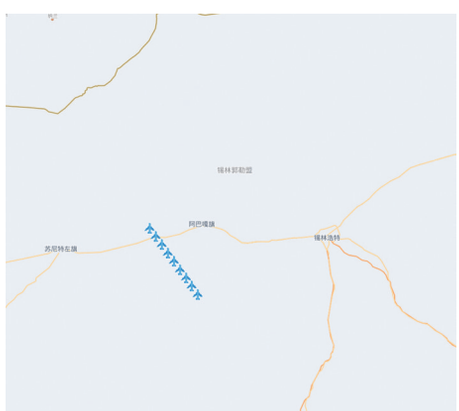

Fig.8 Track display
图8 航迹显示

2) 雷达P显组件

组件输入：目标位置信息；组件功能：将雷达可以探测到的目标信息实时显示出来。该组件全面模拟机械扫描雷达的工作流程。首先，在雷达启动前，系统预先计算并记录目标在不同时刻相对雷达的方位和距离信息；随后，当雷达扫描至目标角度时，信号发生组件根据预设的战情参数生成包含目标回波和干扰的模拟信号，经信号处理组件提取出目标的坐标信息；最后，处理得到的目标位置被实时显示在雷达P显组件上，如图9所示。

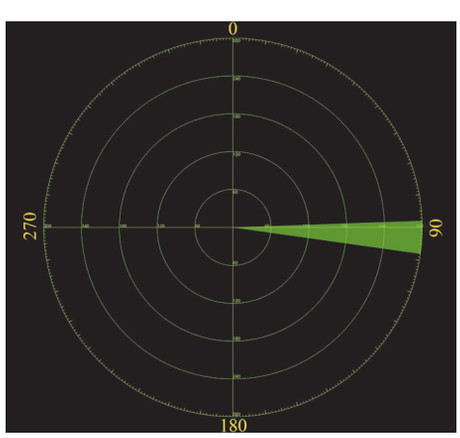

Fig.9 Radar plane position indicator display component
图9 雷达P显组件

本平台的主要组件之间相互独立，采用Qt框架提供的信号与槽(Signal–Slot)机制，实现了组件间的松耦合通信模式。该机制允许组件在不相互依赖的情况下进行高效的数据交换和事件通知，体现了软件工程中的低耦合、高内聚原则。具体而言，参数编辑组件发出参数变更信号，数据库通过相应的槽函数接收这些变更；信号处理组件则通过相应的槽函数捕获这些变更并进行处理；同时，处理结果可通过信号传递至态势显示组件进行可视化呈现。通过信号与槽机制的应用，本文成功构建了一个既能满足复杂雷达仿真需求，又具备良好可扩展性的平台架构，为类似复杂系统的设计提供了有益的参考。

3 仿真验证

将所设计的组件根据不同场景需求进行组装，形成一个完整的雷达数字仿真平台，并进行综合仿真。

3.1 常规探测场景

常规探测场景的雷达数字仿真平台的工作流程如图 10 所示。按照工作顺序将组件装配在一起，如图 11 所示。雷达探测显示界面示意如图 12 所示。给定场景如下：5 架飞机从不同的方向飞向雷达，场景示意图如图 13 所示，雷达扫描结果如图 14 所示。雷达 P 显组件显示的探测结果与所设置的相同，证明了组装的仿真平台的正确性。

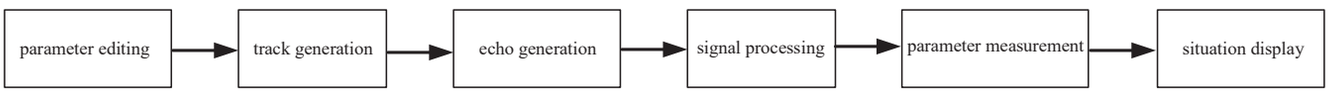

Fig.10 Workflow of conventional detection scenarios
图 10 常规探测场景工作流程

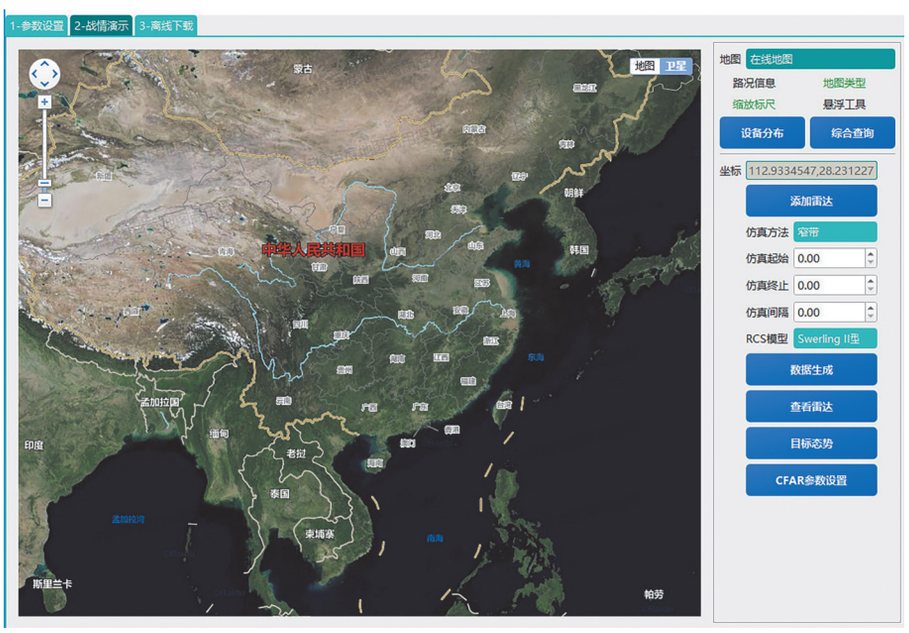

Fig.11 Diagram of radar digital simulation platform interface
图 11 雷达数字仿真平台界面示意图

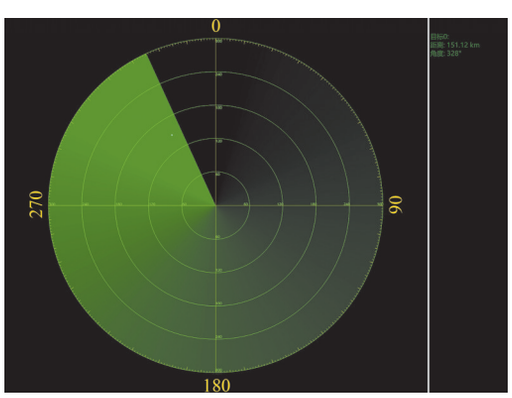

Fig.12 Diagram of radar detection interface
图 12 雷达探测界面示意图

Fig.13 Scene setting and track illustration
图 13 场景设置航迹示意图

3.2 单目标雷达对抗场景

雷达对抗场景下仿真平台的工作流程示意如图 15 所示。给定场景如图 16 所示：飞机旁 1 000 m 处有一架干扰机伴随，设置雷达信号脉宽为 50 μs，带宽为 50 MHz，采样率为 500 MHz；干扰方式为间歇采样转发干扰，间歇采样频率为 10 MHz，占空比为 0.5，干扰增益为 10 dB；目标与雷达间距离为 136 km。匹配滤波结果示意图如图 17 所示。波形显示组件显示的信号与理论值一致，证明了所组装仿真系统的正确性。

3.3 复合作战场景

复合作战场景下仿真平台的工作流程示意图同单目标雷达对抗场景(图 15)。给定场景如图 18 所示，雷达位于上海市区(121.473 7°E, 31.230 4°N)；3 个真实目标分别位于：(121.100 0°E, 31.040 0°N)、(120.700 0°E, 31.370 0°N)和(121.910 0°E, 31.510 0°N)，其中第 3 个目标未受干扰。干扰源包括 2 个使用频谱弥散干扰的干扰机(121.1500°E, 31.100 0°N)、(120.650 0°E,31.350 0°N)和 1 个使用间歇采样转发干扰进行距离欺骗的干扰机(121.24°E, 30.7°N)。

如图 19 所示，位于雷达西北方向的 2 个真实目标均被干扰机遮蔽，雷达西南方向检测到 5 个目标，均为干扰机产生的假目标，雷达东北方向检测到 1 个真实目标。证明了仿真平台在复合作战场景下的正确性。

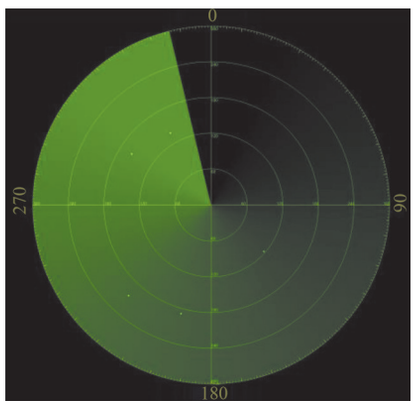

Fig.14 Illustration of radar detection results
图 14　雷达探测结果示意

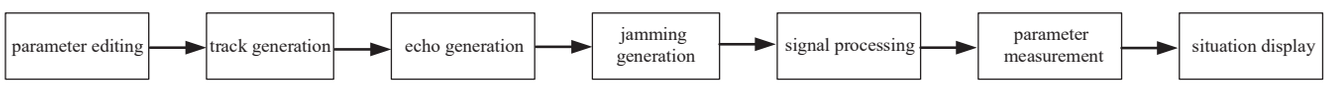

Fig.15 Workflow of radar countermeasure scenario
图 15　雷达对抗场景工作流程

Fig.16 Illustration of radar countermeasure scenario
图 16　雷达对抗场景示意图

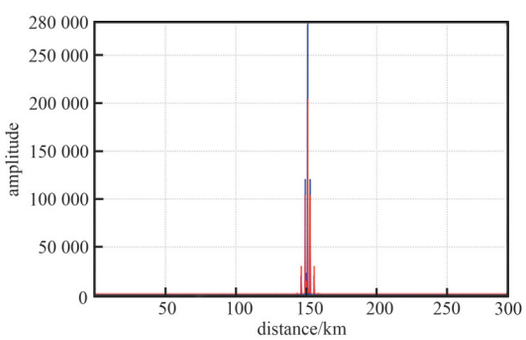

Fig.17 Illustration of matched filtering
图 17　匹配滤波示意图

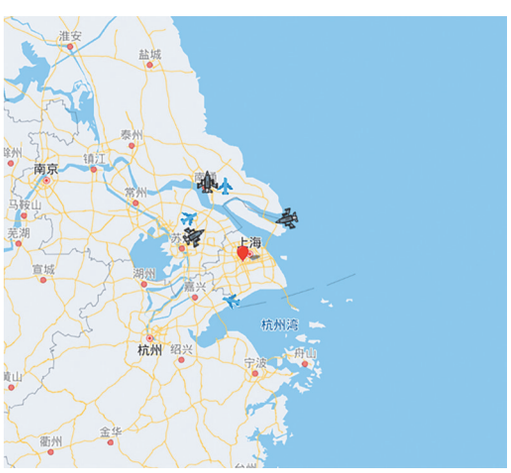

Fig.18 Illustration of radar countermeasure scenario
图 18　雷达对抗场景示意图

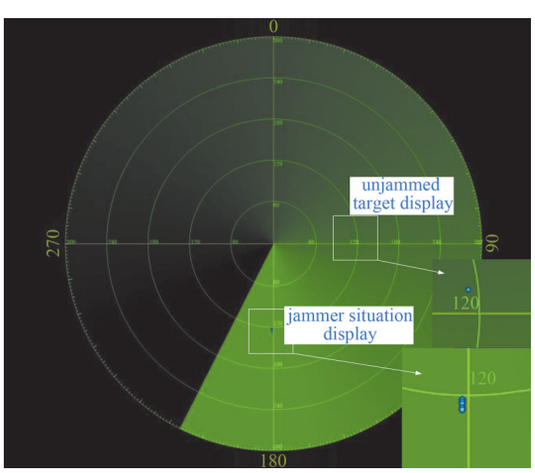

Fig.19 Illustration of radar detection results
图 19　雷达探测结果示意

4　结论

雷达数字仿真平台是雷达探测技术与数字仿真技术的结合，具有经济性、灵活性、可重复性等多种好处。本文以组件化的方式实现雷达作战仿真系统，研究成果主要包括雷达作战过程的组件化形式流程设计、各组件的原理阐述和系统的仿真验证。组件化设计使得每个组件之间相对独立，具有可重用性。组件的具体设计，包括组件总个数、数据流通过程以及每个组件的输入输出和实现功能有待依照实际情况灵活调整。

参考文献：

[1] 伍光胜,郑明辉,黄远铮. COM/DCOM技术的分析及应用[J]. 计算机应用研究, 2001,18(9):64-67. (WU Guangsheng,ZHENG Minghui,HUANG Yuanzheng. The analysis and application of COM/DCOM technique[J]. Application Research of Computers, 2001,18(9):64-67.) DOI:10.3969/j.issn.1001-3695.2001.09.021.

[2] 周捷,高沈钢,顾永生. 基于组件的应用系统构造方法研究[J]. 电子世界, 2017(14):75. (ZHOU Jie,GAO Shengang,GU Yongsheng. Research on component-based application system construction method[J]. Electronics World, 2017(14):75.) DOI:10.3969/j.issn.1003-0522.2017.14.057.

[3] 卢冀,陈皓晖,李万玉. 面向雷达数字化设计与仿真的仿真转台建模研究[J]. 火控雷达技术, 2023,52(3):141-145,150. (LU Ji, CHEN Haohui,LI Wanyu. Research on simulation turntable modeling for radar digital design and simulation[J]. Fire Control Radar Technology, 2023,52(3):141-145,150.) DOI:10.19472/j.cnki.1008-8652.2023.03.025.

[4] 孔德强,杨保平,张秀媛. 一种雷达抗干扰模拟训练系统[J]. 兵工自动化, 2024,43(3):87-91. (KONG Deqiang,YANG Baoping, ZHANG Xiuyuan. Radar anti-jamming simulation training system[J]. Ordnance Industry Automation, 2024,43(3):87-91.) DOI:10.7690/bgzdh.2024.03.018.

[5] 赵海源,王丽芳,蒋泽军. 基于组件化思想的测控软件开发平台设计与实现[J]. 电子设计工程, 2013,21(8):80-83. (ZHAO Haiyuan,WANG Lifang,JIANG Zejun. Design and implementation of general development platform for measurement and control software based on componentization of ideas[J]. Electronic Design Engineering, 2013,21(8):80-83.) DOI:10.3969/j.issn.1674-6236.2013.08.025.

[6] 王毅,赵俊翔,封慧英,等. 组件化数据监显软件设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2017,25(11):103-106. (WANG Yi, ZHAO Junxiang, FENG Huiying,et al. Design and implementation of component data monitoring software[J]. Computer Measurement & Control, 2017,25(11):103-106.) DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2017.11.027.

[7] 刘晓斌,陈彬,邱晓刚. 一种构建仿真系统模型体系框架的工程方法[J]. 系统仿真学报, 2018,30(12):4529-4535. (LIU Xiaobin,CHEN Bin,QIU Xiaogang. A practical approach for building the model family's framework of a simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2018,30(12):4529-4535.) DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.201812005.

[8] 李文臣,李宏,李文学,等. 组网雷达干扰压制距离试验评估方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(3):385-390. (LI Wencheng, LI Hong, LI Wenxue, et al. Test and evaluation method of netted radar blanket jamming distance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(3):385-390.) DOI:10.11805/TKYDA2018035.

[9] MATHKOUR H, TOUIR A, HAKAMI H, et al. On the transformation of object oriented-based systems to component based systems[C]// IEEE International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems. Bali, Indonesia: IEEE, 2008:11-15. DOI:10.1109/SITIS.2008.77

作者简介：

张楷煜(2000-)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为雷达对抗.email:1340975917@qq.com.

吴其华(1990-)，男，博士，讲师，主要研究方向为成像雷达对抗、雷达电子战建模与仿真评估.

刘晓斌(1990-)，男，博士，副教授，主要研究方向为雷达系统仿真.

徐志明(1995-)，男，博士，讲师，主要研究方向为双基地雷达目标特性与特征提取.

艾小锋(1983-)，男，博士，副研究员，主要研究方向为双/多基地雷达、雷达电子战建模与仿真.

赵　锋(1978-)，男，博士，副教授，主要研究方向为电子信息系统仿真建模评估.