

机载火控雷达抗干扰仿真系统设计

张朝丰¹, 李少杰¹, 张双喜¹, 孟涛², 梅少辉¹

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710000; 2. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 研究模拟雷达抗干扰过程以及分析雷达抗干扰技术, 提出了机载火控雷达抗干扰仿真系统设计思路, 详细分析了该系统的各模块功能、处理流程和关键技术等。该系统不仅能够运行回波生成模块以及信号处理模块, 而且能够在已有的基础上对各模块进行优化设计。在不同的干扰条件下, 采取不同的抗干扰技术, 同时在雷达电子对抗过程中, 可以实时地采集各环节的信号数据。该系统在验证雷达抗干扰技术效果方面具有很高的应用价值。

关键词: 雷达仿真; 抗干扰技术; 信号处理; 评估数据; 数据处理; 优化设计

中图分类号: TN 959.73

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.014

Design of Anti-jamming Simulation System for Airborne Fire Control Radar

ZHANG Chaofeng¹, LI Shaojie¹, ZHANG Shuangxi¹, MENG Tao², MEI Shaohui¹

(1. School of Electronic Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710000, Shaanxi, China;

2. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, Sichuan, China)

Abstract: In view of the practical needs of teaching and scientific research, the simulation radar anti-jamming process is studied, the radar anti-jamming technology is analyzed, and a design idea for the airborne fire control radar anti-jamming simulation system is proposed. The functions, processing processes, and key technologies of each module of the system are analyzed in detail. The biggest advantage of the system is that it not only can run the echo generation module and the signal processing module but also is able to optimize the design of each module on the basis of the existing. The system could flexibly adopt different anti-jamming technologies under different interference conditions, and collect the signal data of each key link in real time in the process of radar electronic countermeasures. It has high application value in verifying the effect of radar anti-jamming technology.

Key words: radar simulation; anti-jamming technology; signal processing; evaluation data; data processing; optimization design

0 引言

雷达是通过空间目标对电磁波的反射发现并获得其信息的^[1]。随着时代的发展, 雷达系统模拟技术随着军事需求的不断提高得到了迅速发展。雷达系统模拟就是通过计算机对雷达系统进行仿真, 然后在计算机上显示雷达系统的动态工作过程。该技术主要是利用计算机来模拟目标回波信号和环境信号, 并分析雷达的性能。随着对于雷达功能要求的不断提高, 在雷达系统的设计和分析

中, 需要考虑大量的非线性和随机因素。由于受人力、物力和财力资源的限制, 以及自然条件的脆弱性, 如果在实地进行所有试验, 开发周期将会延长。此外, 实际回波的参数难以控制和量化。相比之下, 采用数字模拟仿真的灵活性更高, 也可以节省人力和物力资源, 消除了技术、材料和环境条件对现场试验的影响。雷达回波信号模拟器的开发已成为雷达研制工作中的重要组成部分^[2]。

火控雷达是机载火控系统传感器的主要来源,

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(62171381)

作者简介: 张朝丰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。

通信作者: 梅少辉(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光电智能探测、遥感图像处理和模式识别与机器学习。

是现代战争中战斗机和轰炸机不可缺少的装备之一。与此同时,高性能机载火控雷达模拟器的研制已成为国内外军事研究领域的热门课题^[3]。雷达模拟器可以根据需要模拟出各种雷达信号,能够调节雷达信号的相关参数,例如,采样频率、脉冲重复周期、带宽等,并且可以消除一些非线性因素对于雷达信号测试的影响。在国外,雷达模拟器的研究从20世纪40年代就开始得到迅速的发展,其中英国、美国、法国、德国在雷达回波模拟器上的研究很具有代表性,他们掌握了很多最先进的雷达模拟技术,并开发出一些比较成熟的产品^[4]:1) 美国Camber公司最具有代表性的雷达系统模拟与仿真软件是Radar Toolkit^[5]。该软件可以在WindosNT/XX-PC的平台上工作,其用途也是非常广泛,不仅可以对不同的环境进行模拟,例如,陆地、气象和海洋等,还能对采样频率、干扰信号、时宽等因素进行模拟仿真。同时由于该软件适用于20多种雷达进行模拟与仿真,因此备受厂家的青睐,成为Camber公司最具有代表性的雷达仿真平台。2) 英国DERA Sea Systemsss公司研制的NaRcosiSiS雷达系统,是著名的海军雷达目标仿真平台,该系统可以在HP700、PC等平台和Unix、Windows等操作系统上运行。该平台可以对各种类型的杂波进行模拟,例如,地杂波、海杂波等,并适用于多种雷达在不同环境下进行相应的性能评估与分析。3) 美国ELANIX公司研发的System View仿真软件是一个科学系统设计的平台,也是可以作为雷达分析的一个可视化软件,这款软件的特点是它的灵活性与便捷性^[6],使用者只需要从图标库中调出需要使用的图标,然后进行参数的设置与调整,最后进行连线即可,非常便于实验结果的分析。

我国虽然在20世纪90年代才开始对雷达模拟器进行大范围的研究,但是从20世纪90年代到现在,已取得了非常大的成就,其中具有代表性的有以下几个:1) 西安电子科技大学研制的一种主要基于直接数字合成(Direct Digital Synthesis, DDS)的雷达模拟器,即利用波形存储和波形重放技术对脉冲雷达机的接受信号进行模拟,并可以根据雷达不同的工作状态进行完整的分析仿真。2) 国防科技大学模拟舰船雷达仿真平台,该平台有在线和离线2种结构,航迹的管理和对目标的探测都是由在线结构进行,不同环境对雷达性能的影响由离线结构进行分析和处理。3) 北京理工大学研究的雷达回波

仿真平台采用计算机和数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)结合,利用DSP进行目标信息的计算、杂波干扰数据输入和测量精度的结果、收集角度信息、输出目标信号以及杂波和噪声信号^[7]。

除了以上的研究成果外,我国的雷达系统仿真技术也在稳步发展,例如,南京理工大学在Matlab的平台上,结合电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)技术建立了脉冲压缩的仿真模型等。

本文设计了机载火控雷达抗干扰仿真系统,能够多样化地仿真雷达干扰环境,并能够自主选择一种或多种抗干扰技术,准确地还原雷达抗干扰的过程以及实时采集各个关键环节的数据,通过数据对比,对抗干扰技术的效果进行评估分析。与国内外同类型产品相比,该系统不仅能够进行回波信号的模拟仿真,运行相关信号处理模块,而且能够对各模块进行优化设计,能够在不同的干扰条件下,灵活地采取抗干扰技术并且优化抗干扰算法,使抗干扰效果达到最优。可灵活自由添加多种干扰信号,使该系统更切合实际雷达作战场景等。在雷达电子对抗过程中,该系统可实时采集各关键环节的信号数据,进行相关性能指标的分析,同时较准确地根据不同的杂波环境在主界面上实时动画显示飞机航迹以及数字化实时显示飞机运动位置及状态,在验证雷达抗干扰技术效果方面具有很高的应用价值。

1 需求分析

为分析研究不同抗干扰技术在不同的干扰信号下的抗干扰效果,找到特定干扰信号情况下最优的抗干扰技术,因此该系统必须满足以下几个条件^[8]。

1) 基于干扰模型构建雷达抗干扰处理算法和抗干扰处理机理的研究模块。通过模拟典型压制干扰、欺骗干扰以及自定义干扰,展示雷达受干扰后,雷达信号的变化、目标显示画面的变化等。

2) 基于数学模型构建杂波环境,产生杂波信号。根据不同的场景,通过建立数学模型,模拟产生相应环境下的杂波信号。

3) 基于软件平台模拟能够展示不同干扰类型下,各型机载火控雷达在各阶段处理时的信号变化,且通过建立雷达抗干扰能力评价指标,对不同干扰样式下的抗干扰能力进行评估。

4) 可通过对软件中雷达信号、波束形状、信号/处理算法进行优化设计、调整、再编程,从而研究出雷达抗干扰能力提高的方法。

2 系统架构

为了达到该系统的设计需求,较为逼真准确地还原雷达电子对抗的过程,实时监测各个环节各信号的幅频特性的变化,同时得到准确性更高的信号数据和抗干扰效果。采用分布式主机的架构形式,不同的主机负责相应的模块^[9],尽可能准确地还原雷达抗干扰的过程以及实时采集各个环节的信号数据。对于雷达干扰部分,系统具备固有的干扰形式,并且也支持重构和优化。同样,对于抗干扰算法,系统支持优化抗干扰算法以达到最优的抗干扰效果^[10]。因此,基于该系统的设计思路所得到的信号处理环节所获取的数据也就更加具备真实性、实时性、准确性,为机载火控雷达的战术使用提供参考,为雷达抗干扰技术的分析改善提供了更加良好的平台。整个系统框架采用 C++ 编程语言实现,系统开发所需要的软件环境见表 1。

系统通过 Matlab 对雷达目标回波信号、杂波信号、干扰信号进行建模仿真,并验证抗干扰算法的准确性与适用性,基于 Qt 平台以及 Visual Studio 2017 编译环境,运用 C++ 语言对软件系统进行设计,比如登录模块设计、主界面模块设计等。

表 1 开发环境

Tab. 1 Development environment

序号	名称	版本号	用途
1	Visual Studio	2017	为数据库管理维护工具提供编译环境
2	Qt	5.12.6	用界面开发框架,提供编译环境
3	Matlab	2016	科学计算及建模工具

该系统架构设计如图 1 所示,主要包括登录模块、主界面模块、回波信号建模仿真模块、信号处理模块等几个模块组成。系统中的各个模块实现不同的功能,但模块之间相辅相成,互相关联,它们之间通过各模块设置参数的关联性,信号数据处理后的流动性以及系统功能操作有序地结合在一起。登录模块需要用户输入正确的用户名和密码后才能进行下一步操作。登录系统后,进入系统主界面,在主界面上,可以实现动态链初始化、界面动画的载入等功能。信号处理模块是采用不同方法对回波信号进行处理。回波信号建模仿真模块则是根据各种信号的数学模型以及参数设置产生不同的回波信号,然后将产生的回波信号递送至信号处理模块进行后续的杂波抑制、抗干扰工作。

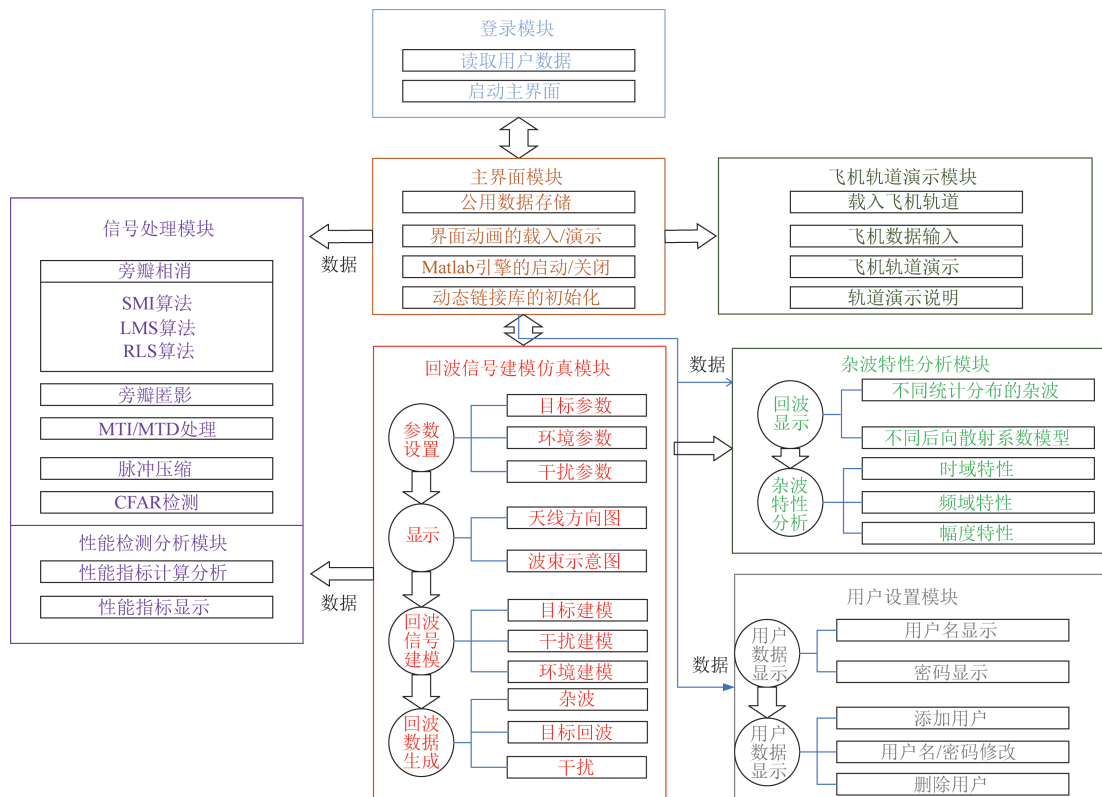


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

图 1 为该系统架构图。该系统由登录模块、主界面模块、信号处理模块、回波信号建模仿真模块、飞机轨道演示模块、杂波特性分析模块、用户设置模块组成。其中,登录模块以及用户设置模块主要用于用户登录系统及保存用户相关信息;主界面模块主要用于各个模块的选择以及系统运行流程的确定,例如,通过选择回波信号建模仿真模块对不同参数的回波信号进行建模仿真后,在信号处理模块中选择合适的抗干扰算法,抗干扰算法主要包括旁瓣相消(采样矩阵求逆(Sample Matrix Inversion, SMI)算法、最小二乘滤波(Recursive Least Square, RLS)算法和最小均方(Least Mean Square, LMS)算法)、旁瓣匿影、动目标检测/动目标显示(Moving Target Display/Moving Target Detection, MTD/MTI 处理)、脉冲压缩、恒虚警检测(CFAR 检测)对回波信号进行相关处理,并在性能检测分析模块上对回波信号的性能指标进行分析;杂波特性分析模块主要用于通过设置不同统计分布的杂波信号,确定不同回波信号仿真的环境。

在该系统中,雷达回波信号建模仿真模块和信号处理模块是重要部分。其中,雷达回波信号建模仿真模块包括目标回波信号建模仿真、杂波信号建模仿真、干扰信号建模仿真,利用相应的模块可对目标参数、目标所处环境、干扰形式进行建模仿真,以及设置雷达的工作参数,进行相应的信号处理后以产生雷达对抗过程中各环节信号数据^[11]。雷达干扰信号的产生模块能够模拟典型压制干扰、速度/距离欺骗干扰以及自定义干扰,也可以将噪声干扰信号与目标回波信号经过卷积、放大形成灵巧式干扰。可支持干扰样式产生及干扰机理的研究,也可通过对干扰算法进行优化设计再编程产生各种新的雷达干扰样式^[12]。

3 系统运行流程

首先,在系统运行前,根据需要对系统各模块工作参数进行设置,主要包括雷达天线方向图设置、载机参数设置、发射信号参数设置等^[13];其次,设置目标参数和环境参数,包括目标航迹规划、杂波环境、干扰信号环境等,或者读取已设置好的目标以及环境参数,也可以把之前进行仿真实验后的参数保存下来,方便于其他所需实验的使用;最后,系统开始运行,运行流程如图 2 所示,在雷达电子对抗的过程进行的同时,实时采集各环节的信号数据

以及信号处理后的评估指标,对于验证抗干扰效果以及选择更为准确的抗干扰措施,则采用回波信号数据比对的方式分析抗干扰效果并进行相应的选择,如果系统运行过程中出现操作不当^[14],则需重新对各个部分进行设置,直到满足需求为止。

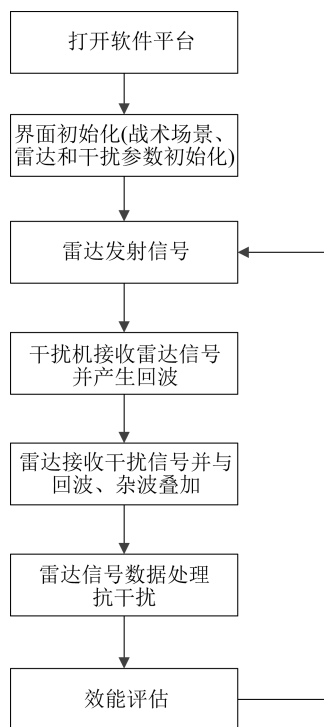


图 2 系统处理流程

Fig. 2 System processing flow

4 关键技术

4.1 数据库存储管理技术

主要是用于保存编辑好的各个环节参数或者保存固有的应用实例,主要目的是为了便于复现一些特定的雷达电子对抗过程。

4.2 时空关联性技术^[15]

时间和空间是仿真实验中非常重要的因素,不论是在现实机载火控雷达的使用,还是在系统仿真实验的运行中,都必须具有相关性和一致性。目标物体空间位置的改变必然有着时间的伴随性,从而造成雷达电子对抗以及电磁环境的变化;对于机载雷达来说,高速的物体随着时间的推进,必然会发生空间位置的变化,具体目标的位置和时间是直接相关的。在该系统中为体现时空的关联性,采取时

间延迟等效空间模型。

4.3 实测数据导入技术^[16]

为了进一步提高该系统的全面性以及更加符合实际情况,得到更加真实的仿真实验数据,该系统可支持不同数学模型的导入,复现外场的某一特定环境,以及根据外场实测数据对已有的数学模型进行修正以达到更高的准确性和真实性。例如导入不同类型的杂波信号、各种干扰信号,以及不同的目标回波等数据,使该系统雷达抗干扰效果更加真实有效。

5 系统应用模式

系统的应用主要是为了分析验证雷达抗干扰技术的效果以及选择最优解,因此从 2 个方面进行分析研究:1) 从抗干扰技术的基本原理、不同抗干扰技术所涉及的关键技术入手,了解不同的抗干扰技术所适合应用的干扰方式以及在具体抗干扰技术算法上,对其进行改进和优化以达到更好的抗干扰效果;2) 对于某种特定的干扰信号,比如有源压制干扰信号、欺骗干扰信号等^[17],采用不同抗干扰技术后信号数据比对的方法,找出对于特定干扰信号的最优的抗干扰技术。评价指标主要为实施抗干扰措施前后,目标信号发现概率和信噪比等^[18]。

实验最后都会应用于实践,因此需要该系统能够提高飞机在不同干扰环境下的适应能力,做到对于敌方不同的干扰信号能够自主地选择最优的抗干扰技术进行抑制^[19]。首先,利用回波信号建模仿真模块设置雷达相关参数及目标回波参数;其次,模拟各种具体的干扰信号,采取不同抗干扰技术,研究相应的抗干扰效果;最终,通过仿真效果评估分析,在不同干扰信号下,根据所采取抗干扰技术后的目标回波信号进行分析,找出相应最优的抗干扰技术。例如,对于有源压制式干扰,一般使用自适应零陷措施比较合理^[20];对于一些海杂波、地杂波等信号,一般采取动目标检测、杂波图等抗干扰技术。总之不同干扰信号下,应采取相应的抗干扰技术,以达到最优的抗干扰效果^[21]。

6 系统界面设计

设计的系统主界面如图 3 所示,主要包括各参数设置模块、信号处理模块、数据处理和性能评估

模块,以及一些典型的案例可以直接运行。对于设置好的参数,主界面可以显示出对应的飞机动画演示以及部分实时的目标数据,可方便更好地观察分析。

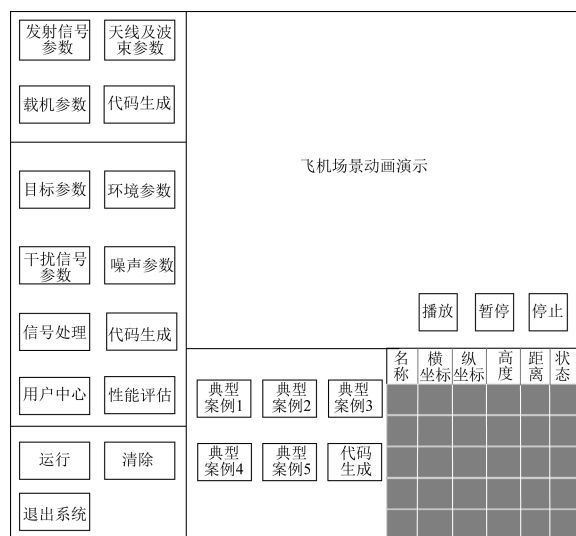


图 3 系统主界面

Fig. 3 Main interface of the system

干扰信号参数设置界面如图 4 所示。用户可选择的干扰类型有瞄准式干扰、脉冲干扰、阻塞式干扰、应答式欺骗干扰、扫频式干扰、切片重构干扰、间歇采样转发干扰、灵巧干扰。用户可添加多个干扰。点击添加按钮即可实现,已添加的干扰会在界面右侧显示。选中特定的干扰,可对其实施参数修改、删除等操作。

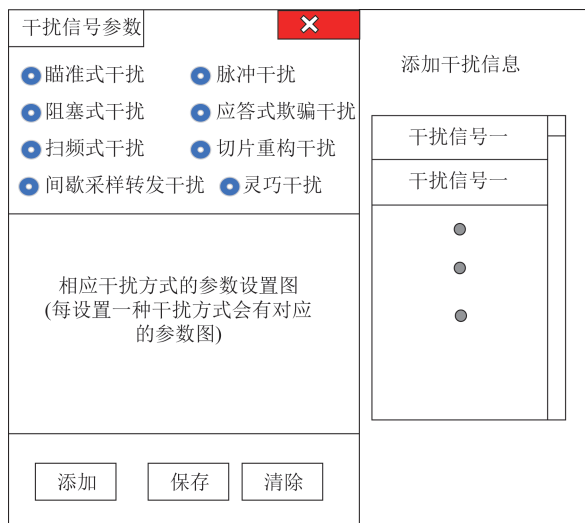


图 4 干扰信号参数界面

Fig. 4 Interference signal parameter interface

信号处理界面如图5所示,可供选择的方法有旁瓣相消、旁瓣匿影、MTI/MTD处理、脉冲压缩、恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)^[22]。其中旁瓣相消有3种权值算法可供选择,分别是采样SMI算法、RLS算法和LMS算法^[23]。用户点击相应的算法,再点击导入按钮,可自行定义算法的使用顺序。已选择的算法可在界面右侧显示。用户对已选择的算法可进行修改和删除操作。对于一些特定的杂波或者干扰,可以使用相应的抗干扰措施进行效果分析以验证抗干扰性能^[24];对于未知干扰的抗干扰措施,需要采用逐次替换抗干扰措施的方法,通过采取方法后的数据比较,确定在特定干扰环境下的最优抗干扰措施,这也是该系统最大的优点。

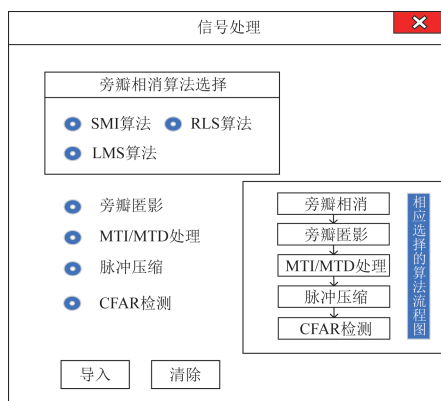


图5 信号处理界面

Fig. 5 Diagram of the signal processing interface

对压制式干扰信号(噪声调频干扰信号)及自适应零陷抗干扰方式进行了仿真,未加噪声调频干扰信号以及叠加噪声调频干扰信号后的回波信号幅度如图6和图7所示。采取自适应零陷抗干扰后的回波幅度如图8所示。

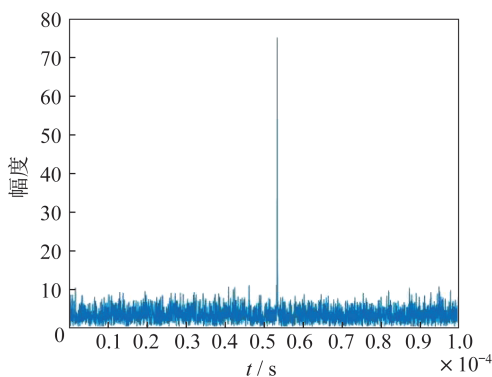


图6 未加干扰的回波幅度

Fig. 6 Echo amplitude without interference

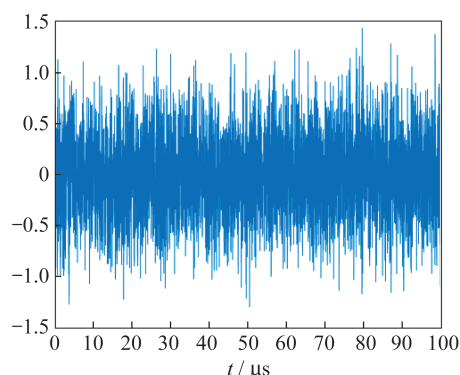
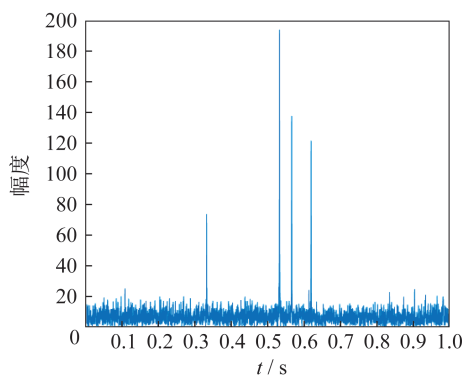
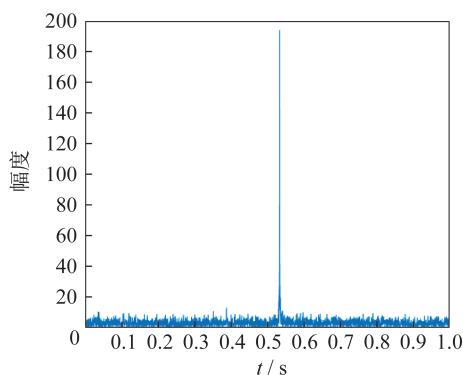


图7 加干扰后的回波时域

Fig. 7 Echo time domain diagram with interference



(a) 抗干扰前



(b) 抗干扰后

图8 抗干扰前后的回波幅度

Fig. 8 Echo amplitudes before and after anti-interference

图6和图7给出了有无干扰信号条件下的回波信号幅度。从两图对比可以看出,加干扰信号后,回波信号被有效地淹没在干扰信号中,无法有效地辨别出真实的回波信号。图8给出了对于加干扰信号后的回波信号实施抗干扰技术后的回波幅度,从图中可以清楚看出,不实施抗干扰技术时,出现了2个目标,无法辨别出真实目标,实施抗干扰技术后,可以准确地辨别出真实目标,达到较好的抗干扰效果。

7 结束语

本文设计的机载火控雷达抗干扰仿真系统,能够构建不同条件下的实验分析环境以及支持外部实验环境的导入,形成准确的雷达电子对抗动态过程,实时采集各环节的实验数据,有助于特定抗干扰技术的分析和研究,也使整个过程更加直观,便于更好地理解,具有一定的实用价值^[25]。但本文未考虑一些其他因素下的雷达抗干扰效果,后续将研究不同体制雷达以及更多因素下的抗干扰效果评估。

参考文献

- [1] 汪玮. 复杂电磁环境下现代雷达抗干扰技术研究[J]. 电子世界, 2018(13): 129-130.
- [2] 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.
- [3] 陈潜, 陆满君, 宋柯, 等. 相控阵雷达导引头技术现状及发展趋势[J]. 上海航天, 2021, 38(3): 157-162.
- [4] 冯明月, 何明浩, 郁春来, 等. 典型相控阵雷达抗干扰仿真平台设计与实现[J]. 现代防御技术, 2014, 42(1): 159-164.
- [5] 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.
- [6] 任明秋, 严革新, 朱勇, 等. 复杂电磁环境下雷达抗干扰性能测试方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1277-1282.
- [7] 李宏, 薛冰, 赵艳丽. 雷达常见抗干扰措施的抗相参干扰性能分析[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(1): 1-4.
- [8] 宫海波, 徐茜, 彭瑞元. 雷达综合试验仿真设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(5): 1-4.
- [9] 赵世明, 孙致月, 张旗. 雷达/红外复合制导并行仿真时空一致性研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1251-1254.
- [10] 王明宇. 基于博弈思维的雷达智能探测概念与研究思路[J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 1-7.
- [11] 谢泽峰, 罗华峰. 舰空导弹导引头抗干扰性能综合评估方法研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 152-156.
- [12] 周永恒, 崔少辉, 方丹. 红外成像导引头抗干扰评估指标体系构建[J]. 现代防御技术, 2019, 47(3): 175-180.
- [13] 杜龙飞. 雷达系统抗干扰效能评估方法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [14] 肖振民, 代培龙, 沈伟, 等. 基于 AHP 的分布式雷达抗干扰效能评估方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(1): 77-83.
- [15] 潘超. 雷达抗干扰性能评估准则与方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [16] 孟宪猛. 低空雷达的智能抗干扰技术研究[J]. 雷达与对抗, 2020, 40(3): 11-15.
- [17] 安红, 张雁平, 杨莉, 等. 面向干扰/抗干扰技术研究的雷达建模方法探讨[J]. 航天电子对抗, 2020, 33(12): 1625-1630.
- [18] 张梅仓, 王磊. 火控雷达认知抗干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(12): 91-94.
- [19] 王鑫, 秦琨, 秦轶炜. 基于干扰认知的智能化雷达干扰对抗系统[J]. 电子信息对抗技术, 2018, 33(6): 48-52.
- [20] 曹运合, 郭勇强, 刘帅, 等. 基于旁瓣对消器的自适应零陷优化设计[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 597-602.
- [21] 孔文青, 宋万杰, 胡敏, 等. 相控阵雷达抗混合干扰算法研究[J]. 信号处理, 2017, 33(12): 1625-1630.
- [22] 李荣锋, 王永良, 万山虎. 自适应天线方向图干扰零陷加宽方法研究[J]. 现代雷达, 2003, 25(2): 42-45.
- [23] 武思君, 张锦中, 张曙. 阵列波束的零陷加宽算法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 10(5): 658-661.
- [24] 郭秀梅. 体系对抗下电子干扰/雷达系统仿真建模的新方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017, 12(3): 267-270.
- [25] 梁国龙, 韩博, 范展. 近场自适应波束形成的零陷展宽方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 34-39.