

基于中频注入的雷达信号模拟器设计与实现

杨春晓, 谢军伟, 盛川, 路文龙

(空军工程大学防空反导学院,西安,710051)

摘要 采用基于中频注入的方法为雷达构建复杂电磁环境,对提高部队在复杂电磁环境下的作战训练水平具有重要意义。研究了一种基于中频注入的雷达信号模拟器的设计与实现,通过对目标回波、欺骗干扰信号和压制干扰信号分析,提出了模拟器系统的总体设计及模块化设计方案,并对该模拟器进行了实际测试。测试结果表明:该模拟器能够实时模拟目标回波、欺骗干扰信号及间歇瞄准式、阻塞式及扫频式等干扰信号,并且可以根据训练环境的需要选择信号输出,满足了设计指标要求,具有较高的实用价值。

关键词 目标回波;干扰信号;中频注入;模拟器

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.05.020

中图分类号 TN95 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)05-0083-05

Design and Realization of Radar Signal Environment Simulator

YANG Chunxiao, XIE Junwei, SHENG Chuan, LU Wenlong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: It is very important to build up a kind of complex signal environments by adopting a method of IF injection to improve and train operators under conditions of the complex electric warfare environments. This paper introduces a radar signal environment simulator. First, through analyzing target echoes, deception signals and jamming signals, an overall concept design and a modularization structure design plan for the simulator are proposed, and its performance is tested. The result shows that this simulator can generate echo, deception jamming, chirp jamming signal, barrage jamming, and interrupted-spotting jamming signal in real-time, and can switch over them in signal channels. The simulator has a great value for matching the design requirement well, and has practical value.

Key words: target echo; jamming signal; IF injection; simulator

随着电子对抗技术的发展,雷达面临的干扰环境日益复杂,如何为战勤人员提供近似实战的电磁环境,对提高部队的作战训练水平具有重要意义。目前干扰训练设备主要采用天线外辐射的方式,干扰从天线进入,对单脉冲跟踪雷达来说,无法形成航

迹,不能够提供逼真的电磁干扰环境,而且设备成本高、操作复杂。雷达中频模拟器可以模拟多目标回波信号及多种形式的干扰信号,将中频信号经电缆注入到雷达接收机,具有良好的实用性和有效性^[1]。

本文根据训练需要,分析了目标及干扰环境,提

收稿日期:2014-12-30

作者简介:杨春晓(1991—),女,山东诸城人,硕士生,主要从事雷达抗干扰关键技术研究。E-mail:cxmandy24@163.com

引用格式: 杨春晓,谢军伟,盛川,等. 基于中频注入的雷达信号模拟器设计与实现[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(5):83-87.
YANG Chunxiao, XIE Junwei, SHENG Chuan, et al. Design and Realization of Radar Signal Environment Simulator[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(5): 83-87.

出雷达信号模拟器的总体设计和各功能模块的设计方案,实现了基于中频注入的雷达信号环境模拟器,能够为战勤人员提供接近实战的电磁环境,对提高部队作战训练水平具有重要意义。

1 雷达信号环境组成

雷达的实际工作环境通常比较复杂,根据作战训练环境的需求,雷达信号模拟器需要模拟的信号环境包括目标回波、欺骗干扰信号和压制干扰信号。

1.1 目标/欺骗干扰模拟

模拟目标回波信号,需要考虑目标的距离、角度以及回波幅度等因素。距离模拟可通过控制目标信号的延时实现;角度模拟可通过控制和差支路信号的幅度和相位实现;目标幅度特性主要与目标距离、目标散射截面积 RCS 以及目标起伏特性有关,可通过采用不同的施威林(Swerling)起伏模型实现^[2-3]。

欺骗干扰信号是指与目标信号特征相同或相似,但又包含雷达难以识别的假信号,使雷达难以将干扰信号与目标回波区分开,从而使雷达无法正常检测和跟踪真实目标或者无法测量真实的目标参数。欺骗干扰信号模拟的原理与目标模拟相同。不同之处在于对发射信号基带样本的延时、多普勒频移和幅相调制参数要根据欺骗干扰方式设置^[5-6]。

1.2 压制干扰信号模拟

压制干扰是通过噪声信号进行幅度、频率及相位进行调制,产生压制性干扰信号^[7-8]。文中主要模拟瞄准式干扰、阻塞式干扰和扫频式干扰,下面分别对其进行分析。

瞄准式干扰须首先测得雷达信号频率 f_s , 然后把干扰机频率 f_j 调整到雷达的频率上,保证以较窄的 Δf_j 覆盖 Δf_r , 在 Δf_r 内的干扰功率强。瞄准式干扰一般满足:

$$f_j \approx f_s, \Delta f_j = (2 \sim 5)\Delta f_r \quad (1)$$

阻塞式干扰 Δf_j 相对较宽,对频率引导精度的要求低,可干扰 Δf_j 带内的所有雷达。阻塞式干扰一般满足:

$$\Delta f_j > 5\Delta f_r, f_s \in [f_j - \Delta f_j/2, f_j + \Delta f_j/2] \quad (2)$$

扫频式干扰扫频范围比较宽,可以对干扰频带内的雷达形成周期性间断干扰。扫频式干扰一般来说满足:

$$\Delta f_j = (2 \sim 5)\Delta f_r, f_s = f_j(t), t \in [0, T] \quad (3)$$

干扰信号是中心频率 $f_j(t)$ 连续、以 T 为周期,在扫频范围内连续调谐的调谐函数。

2 模拟器系统总体设计

该雷达信号模拟器采用软、硬件相结合方式实现,利用 FPGA 控制 DDS 芯片,产生可调的信号,通过调制电路对信号调制产生目标回波、欺骗干扰信号和压制干扰信号^[9-10]。系统由计算机总线、目标回波及干扰信号模拟模块、模拟时序模块及和差网络组成。雷达信号模拟器总体结构图见图 1。

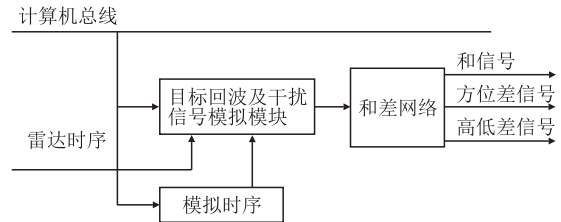


图 1 雷达信号模拟器系统结构图

Fig.1 The structure diagram of radar signal simulator system

由计算机总线对系统总体控制,当存在雷达时序信号时,由其对目标回波及干扰信号模拟模块进行时序控制,当不存在雷达时序信号时,通过模拟时序模块模拟雷达时序,用于系统检查。目标回波及干扰信号模拟模块产生目标回波及干扰信号,经和差网络形成和信号、高低差信号及方位差信号^[11]。

3 系统功能实现

3.1 目标回波及干扰信号模拟功能实现

目标回波及干扰信号模拟模块可实现目标回波、欺骗干扰和压制干扰信号的模拟。目标回波及干扰信号模拟模块框图见图 2。

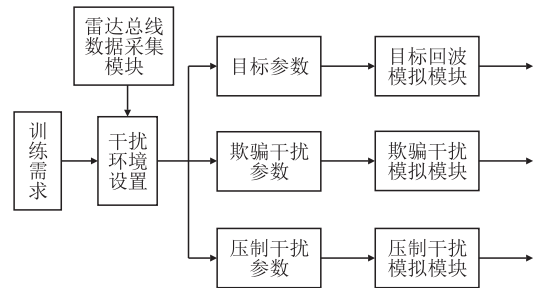


图 2 目标回波及干扰信号模拟模块结构图

Fig.2 The structure diagram of radar echoes modulation

目标回波及干扰信号的模拟模块根据训练想定及雷达总线数据采集模块的数据计算干扰环境参数、目标参数、欺骗干扰参数和压制干扰参数用于目标回波、欺骗干扰信号和压制干扰信号模拟。

根据对目标回波及干扰信号模拟模块结构的分析,功能模块包括目标回波模拟模块,欺骗干扰模拟

模块和压制干扰模拟模块,下面对各功能模块进行分析与设计。

3.1.1 目标/欺骗干扰信号模拟模块

目标/欺骗干扰信号模拟模块见图 3。

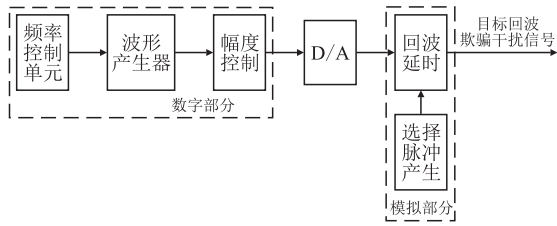


图 3 目标/欺骗干扰信号模拟框图

Fig.3 The diagram of target echoes and deception jamming simulation

频率控制单元产生频率控制字直接控制波形产生器产生连续的回波信号,经过幅度控制后经 D/A 转换输出模拟信号,再经过回波时延输出目标/欺骗干扰信号。

3.1.2 压制干扰信号模拟模块

压制干扰信号模拟框图见图 4。

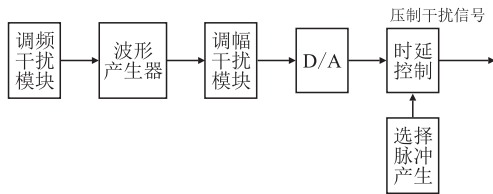


图 4 压制干扰信号模拟框图

Fig.4 The diagram of active clutter jamming simulation

压制干扰信号模拟模块包括调频干扰模块和调幅干扰模块,调频干扰模块对波形产生器产生的信号进行频率调制,再经过调幅干扰模块进行幅度调制,输出的数字信号由 D/A 转换器转换后变为模拟信号,最后经过时延控制输出压制干扰信号。

调频干扰模块和调幅干扰模块功能的实现,主要是采用 DDS 技术产生任意可调的波形。通过 FPGA 将待产生的波形信息转换为频率控制字,控制内核 DDS 产生 FM 和 AM 调制波形,下面对 2 个模块进行介绍。

3.1.2.1 调频干扰模块

噪声调频信号是用噪声对载波进行调频后形成的一种随机信号。噪声调频信号的调频干扰模块见图 5。

频率控制字和波形选择控制字输入波形产生器产生 FM 调制波形,再对信号幅度进行控制后输出,叠加幅度可控的噪声后经限幅器限幅输出幅度可控的频率调制波形。

3.1.2.2 调幅干扰模拟模块

噪声调幅信号是用噪声对载波进行幅度调制后形成的一种随机信号。调幅干扰模块见图 6。

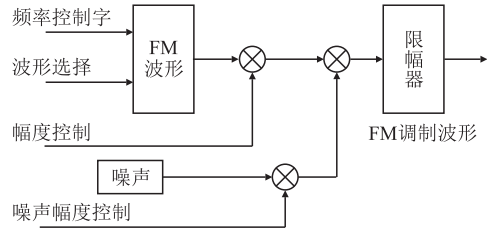


图 5 调频干扰模块

Fig.5 The principle diagram of FM

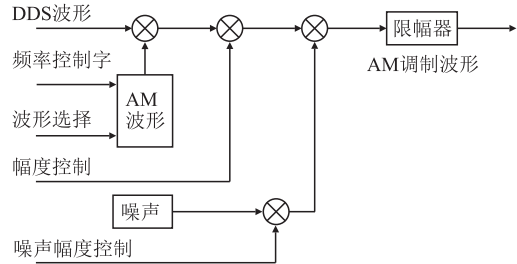


图 6 调幅干扰模块

Fig.6 The modulation diagram of AM

频率控制字和波形选择控制字控制波形产生器产生 AM 调制波形,该 AM 调制波形对 DDS 的输出波形进行幅度调制,输出信号经幅度控制后叠加幅度可控的噪声,经限幅器限幅输出幅度可控的幅度调制波形。

3.2 和差网络模块

目标回波、欺骗干扰信号与压制干扰信号经和差网络形成单脉冲和差 3 路信号,经合成后输入到雷达系统。信号合成模块见图 7。

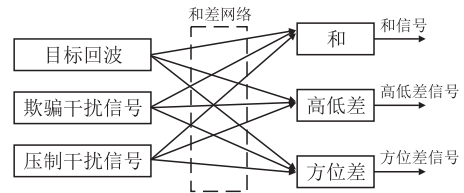


图 7 信号合成模块

Fig.7 The modulation diagram of signal combination

和差网络用于模拟产生单脉冲雷达的和、高低差和方位差三路信号,和差网络原理框图见图 8。

和差网络每一路信号通过控制和差支路衰减器衰减量和 $0/\pi$ 移相器移相量来实现对单脉冲信号的模拟。

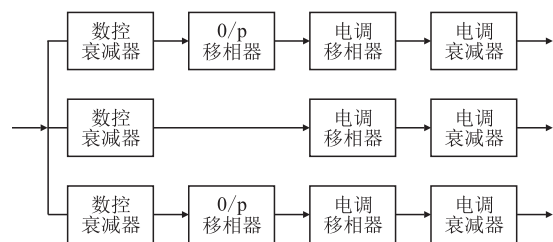


图 8 和差网络原理框图

Fig.8 The diagram of signal combination network

4 测试结果与分析

根据模拟器设计要求,对信号模拟器进行了测试。由于直接获取雷达发射信号样本需要实际雷达设备参与测试,成本大且操作过程过于复杂。在实际测试过程中,通过计算机仿真产生所需的雷达发射信号,并直接存入波形存储器进行后续处理。目标回波信号见图9。

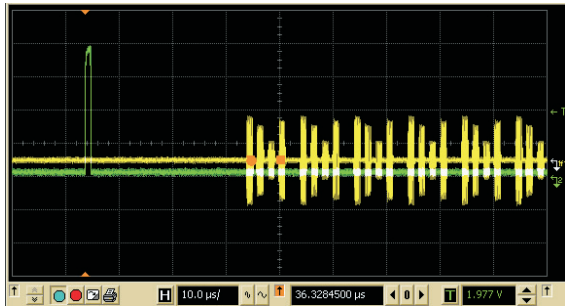


图9 目标回波信号

Fig.9 The oscillogram of radar target echo by the simulator

模拟产生4个目标的回波信号,起始距离为4.5 km,目标距离间隔300 m,脉冲间隔1 us,脉冲重复周期10 us。4路目标回波信号幅度不同反映了不同目标的RCS起伏特性。

对雷达信号模拟器干扰信号产生功能进行测试,干扰信号选择扫频式干扰、阻塞式干扰、间歇瞄准式干扰。测试结果分别见图10~12。

扫频式干扰以三角波方式扫频,扫频带宽为5 MHz,损失带宽为1 MHz,中心频率为35 MHz,扫频频率为10 kHz。频谱图表明,扫频式干扰在一定带宽内实现均匀的干扰频谱,干扰频率扫描对准雷达频率时可实现有效干扰。

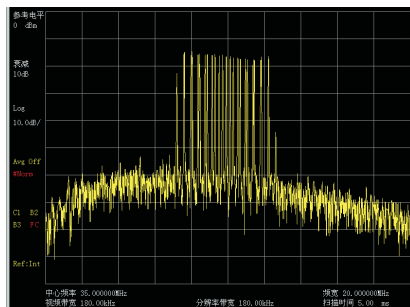


图10 扫频式干扰频谱图

Fig.10 The spectrogram of chirp jamming signal by the simulator

阻塞式干扰以三角波方式幅度调制,带宽为20 MHz,中心频率为35 MHz。频谱图表明,阻塞式干扰能在较宽频段内覆盖雷达信号,只要雷达信号频

率在其覆盖范围内,都将受到有效干扰。

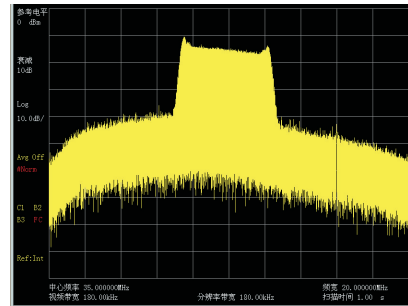


图11 阻塞式干扰频谱图

Fig.11 The spectrogram of AM barrage jamming signal by the simulator

通过调幅+调频实现间歇瞄准式干扰,调频方式为三角波,调频频率100 kHz,调频带宽5 MHz,损失带宽1 MHz;调幅方式为方波,调幅频率5 kHz。测试结果表明:间歇瞄准式干扰频率与雷达频率基本相同,干扰功率集中,干扰信号间歇出现,目标回波信号受到间歇干扰,雷达将很难从目标回波中检测出目标信号,从而实现有效干扰。

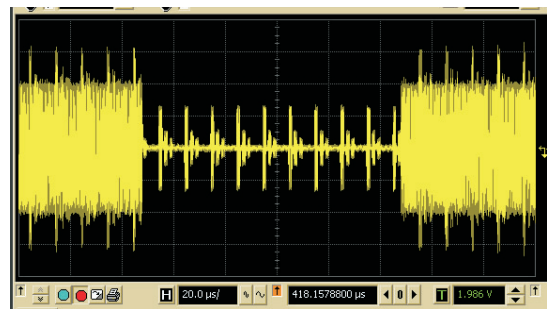


图12 间歇瞄准式干扰

Fig.12 The oscillogram and spectrogram of interrupted-spotting jamming by the simulator

5 结语

本文在分析雷达信号模拟方法的基础上,设计实现了基于中频注入的雷达信号模拟器,可根据训练需要设置干扰环境参数,模拟产生雷达目标回波及间歇瞄准式、扫频式和阻塞式等干扰信号,硬件设计灵活可方便设置系统参数,扩展信号模拟器的应用范围,具有较高的实用价值。

参考文献(References):

[1] 王铁,张金华.一种基于DDS技术的雷达信号模拟器设计[J].船舶科学技术,2010,32(2):51-55.
WANG Tie, ZHANG Jinhua, A Design of Radar Signal Simulator Based on DDS Technique[J]. Ship Science and Technology, 2010,32(2):51-55. (in Chinese)

[2] 李国民,张茜,廖桂生.基于FPGA的雷达目标回波模拟器的设计与分析[J].计算机测量与控制,2012,20(11):2992-3010.

- LI Guomin, ZHANG Qian, LIAO Guisheng. Design and Analysis of Radar Target Echo Simulator Based on FPGA[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(11): 2992-3010. (in Chinese)
- [3] 徐国平. 雷达目标信号模拟器的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2013, 21(16): 29-33.
XU Guoping. Design and Implementation of a Radar Target Signal Simulator[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(16): 29-33. (in Chinese)
- [4] 江海清, 高梅国, 李云杰, 等. 基于FPGA的雷达欺骗干扰信号调制器的设计[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 29-31.
JIANG Haiqing, GAO Meiguo, LI Yunjie, et al. Design of A Radar Deceptive Jamming Modulator Based on FPGA[J]. Modern Radar, 2008, 30(8): 29-31. (in Chinese)
- [5] SUN Minhong, TANG Bin. Noise Amplitude Jamming Signal Suppression Based on Weighted Pursuit[J]. Journal of Systems Engineering Electronics, 2009, 20(5): 962-967.
- [6] WAN Yonglun, LU Youxin. Study of Ultra-wideband Radar Signals-generated Technology Using Two-channel Signal Generator[J]. Journal of Systems Engineering Electronics, 2007, 18(4): 710-715.
- [7] 刘海波, 曾大治, 龙腾. 基于FPGA的宽带雷达信号模拟系统设计[J]. 现代雷达, 2006, 28(16): 69-74.
LIU Haibo, ZENG Dazhi, LONG Teng. Design of Wideband Radar Signal Simulation System Based on FPGA[J]. Modern Radar, 2006, 28(16): 69-74. (in Chinese)
- [8] 鲍学良, 范惠林, 沙俊名. 捷变频PD雷达导引头目标及干扰回波模拟器设计[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 401-408.
BAO Xueliang, FAN Huilin, SHA Junming. Design of Simulator of Target and Jamming Echo for Frequency-agile Pulse Doppler Radar Seeker[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(2): 401-408. (in Chinese)
- [9] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
CHEN Boxiao. The Analysis and Design of Modern Radar [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 许德志, 丁才成. 一种基于DDS技术的信号发生器研究与实现[J]. 电子科技, 2010, 23(3): 59-61.
XU Dezhi, DING Caicheng. Study and Realization of A Signal Generator Based on the DDS Technology [J]. Electronic Sci & Tech, 2010, 23(3): 59-61. (in Chinese)
- [11] MA Junran, ZHANG Chunxi. FPGA-based Waveform Generator with DDS [J]. Electronic Measurement Technology, 2006, 29(4): 78-79.
- [12] 张志敏. 相控阵雷达中频信号模拟器设计与实现[J]. 现代电子技术, 2013, 36(9): 34-36.
ZHANG Zhimin. Design and Implementation of Intermediate Frequency Signal Simulator of Phased Array Radar[J]. Modern Electronic Technique, 2013, 36(9): 34-36. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

(上接第34页)

解决了程序设计中的屏幕闪烁等问题,提高了显示性能,使界面显示清晰,画面流畅。使用图形区域管理技术,解决了人机界面程序计算量大、编程代码繁琐等问题,提高了系统的计算性能,使计算量大大减少,响应时间更短、实时性更强。本文设计的导航显控系统,能够满足当前对于导航显控系统的高可靠性、高实时性、低功耗、体积小要求,已作为备份仪表应用于实践。

参考文献(References):

- [1] Moir Ian, Seabridge Allan. Civil Avionics Systems[M]. UK: Professional Engineering Publishing, 2003.
- [2] 张双, 茹伟, 张磊. 小型综合座舱显示系统软件设计与实现[J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 62-65.
ZHANG Shuang, RU Wei, ZHANG Lei. Design and Implementation of Small Integrated Cockpit Display System Software[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(6): 62-65. (in Chinese)
- [3] 文圣丰. 飞行显示器实时显示设计与实现[J]. 现代电子技术, 2013, 36(14): 35-37.
WEN Shengfeng. Design and Implementation of Real-time Flight Display [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(14): 35-37. (in Chinese)
- [4] 姜琳琳, 赵博龙. 飞行显示器数据处理单元设计与实现[J]. 电子技术应用, 2014, 40(9): 30-33.
JIANG Linlin, ZHAO Bolong. Design and Realization of Data Processing Unit of Flight Display[J]. Application of Electronic Technology, 2014, 40(9): 30-33. (in Chinese)
- [5] 车治川. 基于ARNIC总线协议的综合显示控制系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
CHE Zhichuan. The Research of Synthetical-Display & Controller System Base on ARINC Bus Protocol[D]. Xian: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [6] ARINC Specification 429-12 Mark 33 Digital Information Transfer System [Z]. USA: The Airline Electronic Engineering Committee, 1990.
- [7] WindML3.0 SDKProgram's Guid[M]. USA: Wind River System Inc, 2002.
- [8] Wind River System, Inc. VxWorks Programmer's Guide [M]. USA: Wind River System, Inc, 2003.
- [9] 蒲元远, 吉高卿. 基于WindML的图形界面控制系统设计[J]. 舰船电子工程, 2014, 23(5): 83-86.
PU Yuanyuan, JI Gaoqing. Design of Graphics Control System Based on WindML[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 23(5): 83-86. (in Chinese)
- [10] WindML3.0 API Reference[M]. USA: Wind River System, Inc, 2002.

(编辑:徐敏)