

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417591

无人机载多体制宽频雷达波形模拟电子靶标设计^{*}白迪¹ 梁肇龙¹ 崔勇强¹ 白立云² 黄韬³(1.中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430074;2.武汉船舶通信研究所 武汉 430079;
3.中国移动通信集团湖北有限公司 武汉 430021)

摘要: 随着现代军事技术的快速发展,雷达系统在战场上的应用日益广泛,但受限于空域、地形等环境因素,雷达系统性能和可靠性的测试难以在真实信号环境中完成。针对这一挑战,本文提出了一种基于 ZYNQ 多核处理器和 ADRV9009 射频收发芯片架构的无人机载多体制宽频雷达波形模拟电子靶标设计方案。系统在雷达算法方面采用模块化设计,从捷变、重频等脉间特性以及调频连续波等脉内特性入手,设计了相应的生成算法,能够灵活扩展雷达的数量。实测结果证明,电子靶标在捷变模块测试相邻峰峰值和带宽误差分别为 0.94% 和 0.121%,重频模块对参差、抖动、滑变的 PW 和 PRI 测量均方根误差分别为 0.51、0.42 和 0.47,脉内模块中对调频连续波调频范围的测量误差为 0.54%,对二、四、八相编码码元宽度的测量均方根误差分别为 0.005 3、0.004 8、0.003 8。相比于传统雷达信号模拟器,本文设计的电子靶标具备高集成度、低功耗、小体积以及丰富雷达波形的同时发射支持和宽范围的发射频率调节等优势,有助于提升雷达系统的对抗演练和测试效果。

关键词: ZYNQ; ADRV9009; 无人机; 多体制雷达波形模拟; 宽频宽带

中图分类号: TN955 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Design of electronic target for waveform simulation of multi-system
broadband radar on UAVBai Di¹ Liang Zhaolong¹ Cui Yongqiang¹ Bai Liyun² Huang Tao³

(1. College of Electronics and Information Engineering, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Shipboard Communication Institute, Wuhan 430079, China; 3. China Mobile Communications Group Hubei Co., Ltd., Wuhan 430021, China)

Abstract: With the rapid advancement of modern military technology, radar systems are widely used on battlefields. However, due to constraints like airspace and terrain, testing their performance and reliability in real signal environments is challenging. To address this, a UAV-mounted multi-mode broadband radar waveform simulation electronic target based on the ZYNQ multicore processor and ADRV9009 RF transceiver chip is proposed. The system employs a modular design for radar algorithms, generating waveforms from inter-pulse characteristics such as agility and PRI, and intra-pulse characteristics like FMCW, supporting flexible radar scalability. Tests show peak-to-peak and bandwidth errors of 0.94% and 0.121% in agility testing, RMS errors of 0.51, 0.42, and 0.47 for jitter, stagger, and sliding PRI measurements, 0.54% FMCW range error, and RMS symbol width errors of 0.005 3, 0.004 8, and 0.003 8 for 2, 4, and 8-phase coding. Compared to traditional simulators, this design offers high integration, low power, compact size, rich waveform concurrency, and wide frequency adjustment, enhancing radar testing and countermeasure training.

Keywords: ZYNQ; ADRV9009; UAV; Multi-mode radar waveform simulation; broadband

0 引言

随着现代军事技术的发展,战场环境日益复杂,作战对抗演练的重要性愈加凸显。然而,在演练过程中为避免使

用真枪实弹造成的高昂成本和潜在危险,如何有效模拟真实战场成为了一个重要的课题。尤其是对于雷达系统的训练,由于高性能、高精度雷达系统在装备前需要经过大量外场测试,以确保其可靠性,但传统的测试方法往往耗时长、

收稿日期:2024-12-10

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62201621)项目资助

成本高,并且外界环境的不可预测性增加了测试的复杂性。因此,研制一种能够模拟外场测试条件的雷达回波模拟器显得尤为重要^[1]。这种模拟器不仅可以还原真实的测试场景,还能为各个功能模块提供测试信号,解决测试流程复杂、周期长等问题,提高雷达系统在极端情况下的正常工作能力和稳定性。其次,传统的雷达模拟源由于受限于空域、地形等环境因素,放置和操作不够灵活,难以在复杂的三维空间中模拟多变的目标环境。而在近期的俄乌冲突中,无人机作为新型战场工具的广泛应用,体积小、机动性强、能够按预定坐标飞行、结果简单且成本低,均充分展现出其丰富的优势^[2-3]。因此,利用无人机作为载体进行雷达对抗演练,不仅可以灵活模拟真实战场目标的多维位置,还能大大提升对抗训练的有效性和真实性。

战场上的雷达信号类型繁多,以下选取几种具有代表性的战场设备进行说明:雷神公司主导研发的爱国者防空导弹系统,其 PAC-3 反战术导弹通常使用连续波信号,信号频段位于 X 波段(8~12 GHz)。法国“勒克莱尔”主战坦克配备有一套先进的火控雷达系统,该系统采用脉冲信号,频段工作在 Ku 波段(12~18 GHz)。洛克希德·马丁公司开发的宙斯盾作战系统中,AGM-114 地狱火导弹和 SM-2 导弹常用连续波信号,信号频段覆盖 S 波段(2~4 GHz)和 X 波段(8~12 GHz)。除了战场雷达,由武汉大学研制的船载测波雷达使用的频段也同为 S 波段^[4]。显然,考虑到人员安全和成本因素,这些设备在对抗演练中不可能真实使用,但通过雷达电子靶标就可以对这些真实的战斗设备进行模拟演练。

目前,雷达回波模拟器主要可分为 3 大类。第 1 类为纯软件雷达模拟器,其通过计算机编程生成目标信号、杂波干扰等信息。朱保安等^[5]基于 Microsoft Visual Studio 环境,采用 C# 语言开发了一套雷达模拟器软件。然而,由于通用计算机在信号处理方面缺乏优化,导致数据生成速度慢,难以满足实时性要求。第 2 类是基于雷达回波仿真板的模拟器,这类模拟器利用专用硬件生成目标回波信号,但受限于仿真板的内存容量,生成的回波信号范围有限,仅适用于特定雷达系统,灵活性不足^[6]。第 3 类为集成多种板卡的雷达回波仿真模拟器,其包括信号回放板、信号处理板、存储板以及主控板等组件。通过集成这些组件,此类系统能够模拟复杂的电磁环境,生成目标与干扰回波,具备信号生成速度快、实时性高的优势。Strydom 等^[7]基于数字射频存储器(digital radio frequency memory, DRFM)技术,设计了一种硬件在环(hardware in the loop, HIL)雷达环境模拟器,能够实时生成复杂目标回波和杂波信号,并成功应用于雷达系统的测试与评估。该模拟器通过 DRFM 技术实现了对目标速度、位置以及复杂电磁环境的精确模拟。任亚欣等^[8]采用专用微波模块板卡、现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)及模数转换(analog to digital, AD)/数模转换(digital to analog, DA)板

卡实现雷达回波模拟器,对雷达探测目标的距离和大小进行模拟。此外,还有研究基于全可编程片上系统 ZYNQ-7000、DAC 芯片 AD9164 及射频芯片 AD9361 构建雷达模拟系统,将混频、滤波等功能集成一体^[9],但数据生成仍存在耗时长、效率低的问题。同时, Bantle 等^[10]基于多核 PC 平台,配备外围组件互连高速接口(peripheral component interconnect express, PCIE)FPGA 板,设计了一种能够实时模拟脉冲多普勒雷达环境的雷达环境模拟器。然而,由于使用多块板卡,这类系统通常体积庞大、功耗较高,集成度较低^[11-12],不适合搭载于无人机上。

在集成多种板卡的雷达模拟源设计中, FPGA+直接数字频率合成(direct digital synthesis, DDS)架构具有信号生成速度快、硬件资源利用率高、成本较低等优点^[13]。然而,该架构也存在一些显著缺点:首先,其数据处理能力相对有限,尤其是在需要复杂算法如实时信号处理、滤波等时, FPGA 的资源可能不足;其次,信号生成的灵活性和动态范围受限于 DDS 芯片的性能,难以满足多样化雷达波形的生成需求;此外,系统的实时反馈能力和扩展性较弱,缺乏对生成信号的实时调整和处理能力,且体积较大,系统的实时性和便携性不足。为解决上述问题,本研究采用了基于 ZYNQ 多核处理器和 ADRV9009 射频收发芯片^[14-15]的设计架构。该架构结合了 FPGA 和高级精简指令集计算机(advanced RISC machine, ARM)处理器的优势,不仅体积小、集成度高,能够搭载于无人机上,而且能够高效处理复杂的并行任务^[16],其中 ARM 处理器凭借其在信号处理中的灵活性和高效性^[17],能够支持多种雷达波形的生成。依靠 ARM 强大运算能力,该系统可以灵活生成不同雷达体制下的回波数据,从而满足多样化的信号仿真需求,提升对抗演练的真实性和有效性。

现代雷达系统测试对波形模拟设备提出了极高的技术要求^[18],测试设备需具备高精度、多体制的雷达波形模拟能力^[19]。为此,本研究设计了一款无人机载多体制宽频雷达波形模拟电子靶标。该设备覆盖 75~18 GHz 的频率范围,支持 400 MHz 的捷变带宽,并具备纳秒级精度的调节能力,可同时生成多达 16 组不同体制的雷达信号,充分满足现代雷达系统对宽频宽带和复杂波形的测试需求。

1 雷达波形模拟电子靶标系统设计

多体制宽频雷达波形模拟电子靶标总体设计方案图如图 1 所示,系统主要由 ZYNQ 信号处理开发板和 ADRV9009 射频收发前端两部分组成。

ZYNQ 信号处理开发板作为整个雷达对抗系统的算法开发平台,处理器系统(processor system, PS)部分负责完成射频模块平台的初始化和控制工作,包括控制发射开关、切换本振频率等操作。系统初始化完成后,进入轮询状态,根据不同指令执行相应操作,其中关键的是雷达信

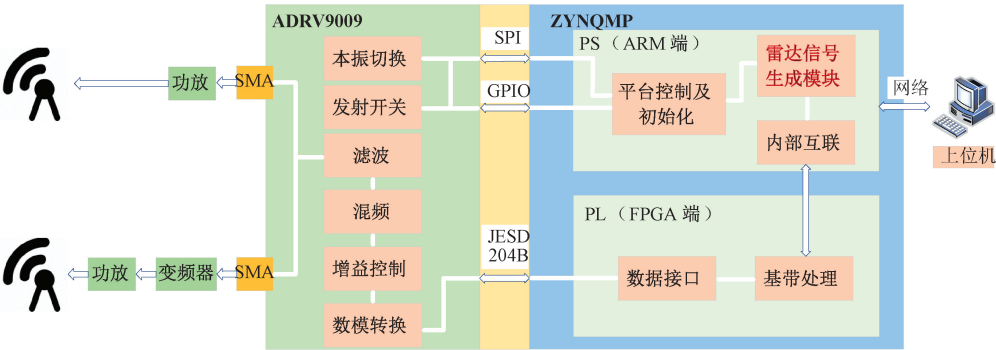


图 1 雷达波形模拟电子靶标总体设计

Fig. 1 Radar waveform simulation electronic target overall design

号生成操作。当系统通过网络接收到来自上位机的雷达参数后,便进入雷达信号生成模块,生成雷达信号的 IQ 数据。随后,数据通过 PS 与可编程逻辑(programmable logic,PL)之间的互联通道传输至 PL 端。PL 部分负责对接收到的 IQ 数据进行高速并行数据处理,并通过 JESD204B 协议将处理后的 IQ 数据传输至 ADRV9009 射频频芯片。

ADRV9009 射频收发芯片支持双通道收发,最大采样率为 491.52 Msps,最大可调谐发射带宽为 400 MHz,频率调谐范围为 75~6 000 MHz。作为雷达波形模拟电子靶标的射频发射前端,其主要负责将雷达信号从基带变频至射频并进行发射。发射通道通过 ADRV9009 对载体传输来

的基带信号进行数模转换和增益控制后,将信号上变频至发射频率。变频后的数据经过滤波处理,最终通过宽带巴伦分为两路,通过亚微型 A 型(subminiature version A, SMA)接口输出信号,其中一路直接输出至功放,另一路经过变频器将 0.75~6 GHz 信号转换成 6~8 GHz 高频信号再输出至功放。

上位机模块通过指令控制界面,如图 2 所示,包括任务列表、信号参数设置、任务控制面板和任务选择功能。任务列表显示任务信息,信号参数设置涵盖脉冲间隔、宽度、功率、频率等关键参数。任务控制面板支持添加、保存、启动和停止任务,任务选择功能支持批量操作,便于高效执行雷达任务。



图 2 上位机示意图

Fig. 2 Host computer schematic diagram

根据上述设计方案,研发出如图 3 所示雷达波形模拟电子靶标系统。该系统由设备仓、功率放大器和天线组成,结构经过精心设计,以满足复杂环境下雷达信号模拟的需求。功率放大器是电子靶标系统的关键部件,根据频段将其分为宽频功放和窄带功放。设备仓是系统的核心部件,内部集成了多块关键电路板和模块,主要包括数字

处理板、模拟射频板和变频器。这些组件协同工作,确保电子靶标能够实时生成和处理复杂的雷达信号。数字处理板负责对信号进行高速处理,生成预设的雷达波形数据;模拟射频板将数字信号转换为射频信号,并通过天线发射;图中发射天线为窄带天线,安装在系统设备仓的后端,当模拟某一个特定雷达时,按其频率等特性选中相应

的功放和天线发射。电子靶标可以搭载在无人机上,突破地形和空域等环境限制,在三维空间内完成对雷达系统回波的模拟操作。接下来将详细介绍雷达电子靶标信号的算法设计。



图3 雷达波形模拟电子靶标系统实物

Fig. 3 Radar waveform simulation electronic target system physical object

2 雷达波形模拟电子靶标系统算法设计

2.1 系统主程序设计

该雷达靶标核心算法实现流程如图4所示。该流程图展示了主程序算法的设计过程,从系统初始化开始,进入主程序后进行模式选择。程序运行过程中主要分为3种模式:透传模式、发射开关模式以及波形生成模式。在透传模式下,系统会将上位机传来的数据按特定格式发到串口或通用功能输出输出(general purpose input output, GPIO)口中。在发射开关模式下,系统会根据上位机指令控制发射开关。在波形生成模式下,系统接收到上位机传来的数据得到雷达的具体参数如脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI)、脉冲宽度(pulse width, PW)、瞬时带宽、工作频率等,然后生成雷达信号并输出波形。在此基础上,系统会判断是否需要多信号叠加,如果不需要则直接进行信号发射,而若需要多信号合成,则会将多个雷达信号进行叠加处理后再发射。

2.2 雷达信号生成模块设计

1) 捷变特性模块设计

定义雷达工作中心频率为 RF ,信号瞬时带宽 Bw ,捷变个数为 N , RF 、 Bw 、 N 由主控计算机进行设定,每个捷变频率 F_i 可以表示为:

$$F_i = RF - \frac{Bw}{2} + i \cdot \frac{Bw}{N-1} \quad (1)$$

捷变模式分为递增捷变、递减捷变和随机捷变,三者的频率计算方式分别为:

(1) 当捷变类型为递增捷变时,信号频率有以下关系:

$$F_j = F_i \quad (2)$$

(2) 当捷变类型为递减捷变时,信号频率有以下关系:

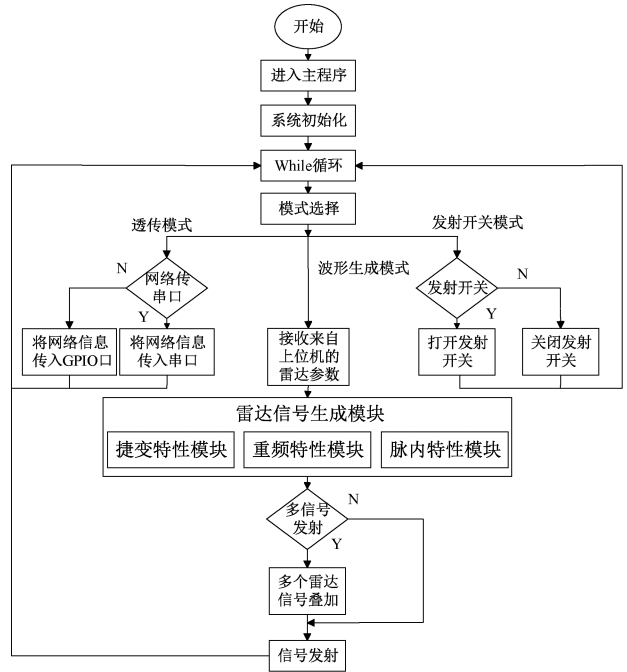


图4 系统主程序流程图

Fig. 4 System main program flowchart

$$F_j = F_{N-1-i} \quad (3)$$

(3) 当捷变类型为随机捷变时,信号频率有以下关系:

$$F_j = F_{\pi(i)} \quad (4)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, N-1$; $\pi(i)$ 是 $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 上的随机数。

当确定频率及捷变个数后,会根据频率个数生成对应的脉冲重复间隔个数,每个脉冲重复间隔中信号的频率会依据捷变模式而变化:递增模式下,每个脉冲重复间隔中信号的频率依次递增,每个脉冲重复间隔中的频率按照式(2)保持一致,使得信号频率呈现出严格的递增趋势。递减模式下,信号频率随着时间逐步递减,具体如式(3)。随机模式下,信号频率不再按照固定顺序变化,而是按式(4)随机排列函数 $\pi(i)$ 在预定频率集合中随机挑选。在频率分集中根据分集数的不同也会产生不同的频率,其产生的信号频率与捷变产生的信号频率原理一致。

2) 重频特性模块设计

在脉冲重复间隔的生成过程中,依据不同的模式可以生成不同的PRI列表。

(1) 重频参差信号

设 $PRIMAX$ 为最大PRI差值, PRI 为基准PRI, N 为参差个数, $PRIMAX$ 、 PRI 、 N 由主控计算机进行设定。重频参差信号PRI列表中每个 i 处的PRI值可以表示为:

$$PRI_i = PRI + i \cdot \frac{PRIMAX}{N-1} \quad (5)$$

当参差模式为递增时,有:

$$PRI_j = PRI_i \quad (6)$$

当参差模式为递减时,有:

$$PRI_i = PRI_{N-1-i} \quad (7)$$

当参差模式为随机时,有:

$$PRI_i = PRI_{\pi(i)} \quad (8)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, N-1$; $\pi(i)$ 是 $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 上的随机数。

当确定参差个数后,会根据参差个数生成对应的脉冲重复间隔个数,每个脉冲重复间隔的长度依据参差模式而变化:递增模式下,每个脉冲重复间隔的长度会按照式(6)所示不断增加。递减模式下,每个脉冲重复间隔的长度会按照式(7)所示依次缩减。随机模式下,每个脉冲重复间隔的长度按式(8)随机排列函数 $\pi(i)$ 在预定 PRI 集合中随机选择。

(2) 重频抖动信号

设基准 PRI 为 PRI , 抖动百分比为 PER , N 为抖动个数, PER 、 PRI 、 N 由主控计算机进行设定。重频抖动信号 PRI 列表中每个 i 处的 PRI 值可以表示为:

递增模式:

$$PRI_i = PRI \cdot (1 + i \cdot PER) \quad (9)$$

递减模式:

$$PRI_i = PRI \cdot (1 - i \cdot PER) \quad (10)$$

随机模式:

$$PRI_i = \begin{cases} PRI \cdot (1 + i \cdot PER), & \text{若随机选择为} \\ \text{递增模式} \\ PRI \cdot (1 - i \cdot PER), & \text{若随机选择为} \\ \text{递减模式} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, N-1$ 。

当确定抖动个数后,会根据抖动个数生成对应的脉冲重复间隔个数,每个脉冲重复间隔的长度依据抖动模式而变化:递增模式下,每个脉冲重复间隔的长度会按照式(9)所示不断增加。递减模式下,每个脉冲重复间隔的长度会按照式(10)所示依次缩减。随机模式下,每个脉冲重复间隔生成时,系统会随机选择递增模式或递减模式,每个脉冲重复间隔的长度根据随机到的模式进行生成,如式(11)所示。

(3) 重频滑变信号

设基准 PRI 为 PRI , 滑变步长为 M , 滑变比例为 PER , PER 、 PRI 、 M 由主控计算机进行设定。重频滑变信号 PRI 列表中每个 i 处的 PRI 值可以表示为:

递增模式:

在递增模式下, PRI 列表以逐步增大的方式生成。首先设定最大的 PRI 值为:

$$PRI_{\max} = PRI \cdot (1 + PER) \quad (12)$$

从基准 PRI 开始,以步长 M 逐步增大 PRI 值,直到其大于或等于 PRI_{\max} , 具体可表示为:

$$PRI_i = PRI + i \cdot M \quad (13)$$

递减模式:

在递减模式下, PRI 列表以逐步减小的方式生成。首先设定最小的 PRI 值为:

$$PRI_{\min} = PRI \cdot (1 - PER) \quad (14)$$

从基准 PRI 开始,以步长 M 逐步增大 PRI 值,直到其大于或等于 PRI_{\max} , 具体可表示为:

$$PRI_i = PRI - i \cdot M \quad (15)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, \frac{PRI_{\max} - PRI}{M}$ 。

当确定基准 PRI 和滑变比例后,会根据滑变模式的不同生成对应的脉冲重复间隔列表:递增模式下,设定一个最大 PRI 值,如式(12)所示, PRI 列表中的值按照式(13)从基准 PRI 开始逐步递增,每次递增的幅度为滑变步长,直到达到最大 PRI 值。递减模式下,设定一个最小 PRI 值,如式(14)所示, PRI 列表中的值按照式(15)从基准 PRI 开始逐步递减,每次递减的幅度为滑变步长,直到达到最小 PRI 值。

3) 脉内特性模块设计

雷达信号的脉内特性主要设置相位编码和线性调频 2 种类型。在设置线性调频时,需要设定工作频率、瞬时带宽以及脉冲宽度,其中带宽和脉宽决定着调频斜率。在设置相位编码时,需选择 3 种类型:二相码、四相码和八相码其中之一,后再选择设置其码元长度和码元宽度。

(1) 线性调频信号

设信号带宽为 BW , 脉冲宽度为 PW , 根据线性调频方向(正斜率或负斜率)得到斜率公式:

$$k = \frac{\pm BW}{PW} \quad (16)$$

瞬时频率 $f(t)$ 随时间变化:

$$f(t) = f + \frac{t}{2}k \quad (17)$$

式中: f 为载波频率。

最终信号的实部和虚部分别为:

$$\operatorname{Re}(s(t)) = A \cdot \cos(2\pi f(t)t) \quad (18)$$

$$\operatorname{Im}(s(t)) = A \cdot \sin(2\pi f(t)t) \quad (19)$$

(2) 相位编码信号

常见的相位编码包括二相码、四相码和八相码。对于每个码元,其相位 θ 随机取值,具体公式如下:

二项编码(2-phase): 相位 θ 随机取值为 $\{0, \pi\}$ 。

$$\theta_i = (r \% 2) \cdot \pi \quad (20)$$

四项编码(4-phase): 相位 θ 随机取值 $\{0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}\}$

$$\theta_i = (r \% 4) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (21)$$

八项编码(8-phase): 相位 θ 随机取值为 $\{0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{3\pi}{2}, \frac{7\pi}{4}\}$ 。

$$\theta_i = (r \% 8) \cdot \frac{\pi}{4} \quad (22)$$

式中: r 是一个随机整数。

对应每个相位编码码元 θ_i , 瞬时信号的实部和虚部分别为:

$$\text{Re}(s(t)) = A \cdot \cos(2\pi ft + \theta_i) \quad (23)$$

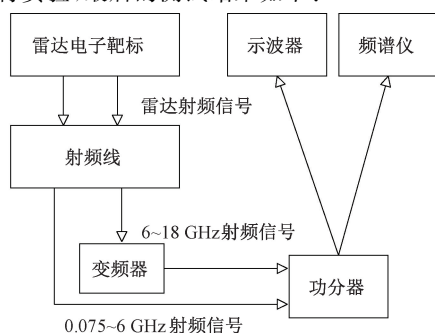
$$\text{Im}(s(t)) = A \cdot \sin(2\pi ft + \theta_i) \quad (24)$$

在获得线性调频信号和相位编码信号的实部和虚部后, 下一步是对这些信号进行数模转换处理转换成模拟信号, 完成射频信号的生成, 以便通过发射端口进行发送。

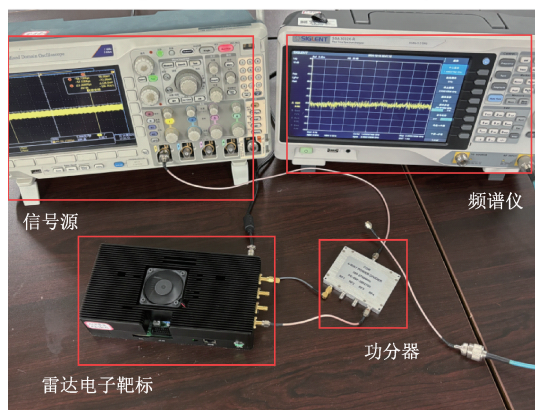
3 雷达波形模拟电子靶标系统测试与分析

实验按图 5(a) 所示搭建实验整体测试框架, 将电子靶标输出的射频信号分两路, 一路通过射频线直接输入功分器中, 另一路通过需经变频器后再输入功分器中。最后再根据测试需求, 将信号接入频谱仪或者示波器中。

实验实际测试场景按照如图 5(b) 所示, 为防止外界电磁等环境干扰, 选择在空旷且远离基地的专用测试实验室中对电子靶标各项功能进行测试与验证。在测试前对频谱仪及示波器均进行了校准验证, 并使用频谱仪对周围环境进行扫描, 主要测试频段内未检测到显著的电磁干扰信号, 再进行实验, 最后的测试结果如下:



(a) 实验整体测试框架图
(a) Experimental overall test framework diagram



(b) 实验实际场景示意图
(b) Experimental actual scenario schematic diagram

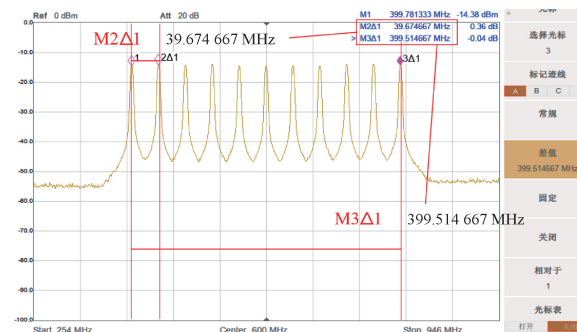
图 5 实验整体测试图

Fig. 5 Experimental overall test diagram

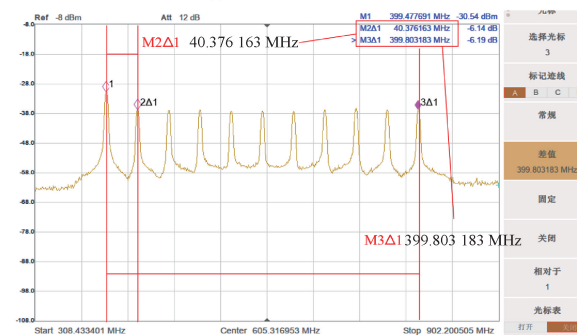
3.1 捷变特性参数测试

实验采用两种不同的雷达射频信号, 分别为频率捷变和频率分集, 作为发射信号, 以验证所设计的宽频雷达波形对模拟电子靶标的频率捷变功能的有效性。测试中, 频率捷变和频率分集信号的瞬时带宽均设定为 400 MHz, 捷变数和分集数也均设定为 11 个。最后, 通过频谱仪的测量功能读取每个信号的带宽以完成验证。

取频率捷变和频率分集的最远两端峰峰值间频率差值为带宽, 频率捷变相邻峰峰值之间的频率差以及带宽如图 6(a) 所示, 频率分集相邻峰峰值之间的频率差以及带宽如图 6(b) 所示, 表 1 汇总了测试结果。由表 1 中数据可知: 测得捷变信号两个相邻峰峰值之间的带宽为 39.674 667 MHz, 与理论值 40 MHz 相差 0.325 333 MHz, 误差为 0.813%。测得分集信号两个相邻峰峰值之间的带宽为 40.376 163 MHz, 与理论值 40 MHz 相差 0.376 163 MHz, 误差为 0.940%。测量出的捷变信号与分集信号的频率分布与上述捷变特性算法模块设计理论值之间的误差较小, 符合系统的设计要求。测得频率捷变的带宽为 399.514 667 MHz, 与设定带宽相差 0.485 333 MHz, 误差为 0.121%; 测得频率分集的带宽为 399.803 183 MHz, 与设定带宽相差 0.196 817 MHz, 误差为 0.049%。综合看出, 捷变频率分布可达到 400 MHz, 满足电子靶标宽频带的设计需求。



(a) 频率捷变
(a) Frequency agility



(b) 频率分集
(b) Frequency diversity

图 6 捷变特性测试结果图

Fig. 6 Agility characteristic test result diagram

表 1 捷变特性测试数据

Table 1 Agility characteristic test data MHz

信号类型	相邻峰峰值		误差/ %	带宽		误差/ %
	理论值	测量值		理论值	测量值	
频率捷变	40	39.674 667	0.813	400	399.514 667	0.121
频率分集	40	40.376 163	0.940	400	399.803 183	0.049

3.2 重频特性参数测试

为了验证电子靶标的重频特性参数,针对高精度时域应用的需求,实验中电子靶标分别选择重频参差、重频抖动、重频滑变信号,来对所设计的宽频雷达波形的模拟电子靶标重频特性进行验证。测试中,重频参差、重频抖动、重频滑变信号均设置为递增模式,脉冲宽度均为 10 ns。具体设置如下:

- 1)重频参差信号的最大 PRI 差值为 50 ns,参差个数为 3 个,基准 PRI 为 50 ns。
- 2)重频抖动信号的抖动比例为 20%,抖动个数为 3 个,基准 PRI 为 100 ns。
- 3)重频滑变信号的滑变比例为 10%,滑变步进为 5 ns,基准 PRI 为 100 ns。

最后,通过示波器的测量功能读取每个信号的脉冲宽度及脉冲重复间隔,以完成测试。

脉间特性的 3 种信号测试均是脉冲重复间隔和脉冲宽度变化的过程,故取重频参差信号为具体例子进行说明,其他两种信号的变化与其类似,图 7 为重频参差的测试结果。由图可详细观察到重频参差信号的脉冲宽度,如图 7 序号 1 处所示,为 10.4 ns。序号 2、3、4 处分别是 3 个脉冲重复间隔的长度,不难看出长度均与所设计的脉间特性算法中式(5)和(6)相对应,分别为 50.4、75.6、100.6 ns,根据均方根误差式(25)得到重频参差的均方根误差为 0.51。

$$RMS\,Error = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$
 (25)

式中: y_i 为 i 时刻测量值; \hat{y}_i 为 i 时刻理论值; n 为预测数据点。

表 2 为测试汇总,由表可见,测得重频抖动的脉冲宽度为 10.2 ns,3 个脉冲重复间隔分别为:99.6、119.4、140.4 ns,均方根误差为 0.42,均与设定的脉冲宽度以及脉冲重复间隔理论值相近。测得重频滑变的脉冲宽度 10.4 ns,3 个脉冲重复间隔分别为:100.8、105.2、109.8 ns,均方根误差为 0.47,均与设定的理论值相近。综合来看,所得 3 种信号的测试值均与所述重频特性算法模块设计理论值相近,且时域精度达到纳秒级,满足电子靶标时域高精度设计要求。

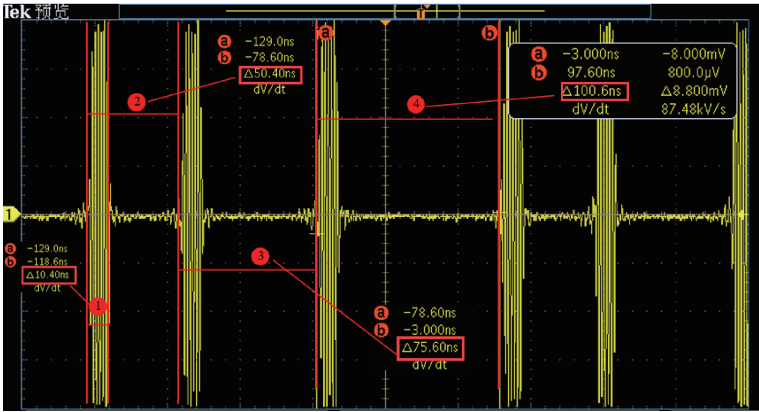


图 7 重频参差参数测试图

Fig. 7 Repetition interval staggering parameter test diagram

表 2 重频特性参数测试数据

Table 2 Repetition interval characteristic parameter test data

重频特性	重频个数	基准 PRI	PW/ns		PRI1/ns		PRI2/ns		PRI3/ns		均方根误差
			理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	
参差	3	50	10	10.4	50	50.4	75	75.6	100	100.6	0.51
抖动	3	100	10	10.2	100	99.6	120	119.4	140	140.4	0.42
滑变	3	100	10	10.4	100	100.8	105	105.2	110	109.8	0.47

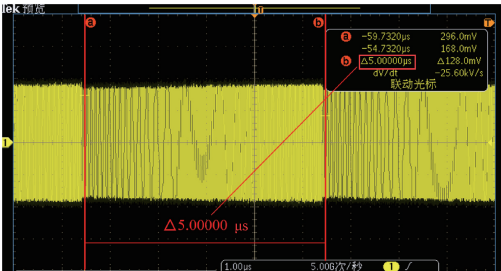
3.3 脉内特性参数测试

为了验证电子靶标的脉内特性参数,针对大带宽信号的应用需求,实验分两组采用线性调频作为发射信号,按

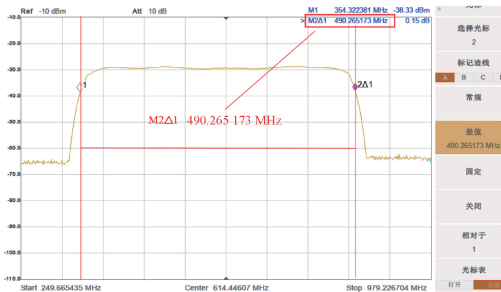
照图 5(a)测试框图,设置雷达电子靶标射频中心频率为 600 MHz,脉冲重复间隔和脉冲宽度均为 5 μ s,调频范围均为 490 MHz,一组设置调频方向为正方向,另一组设置调

频方向为负方向。信号设置后分别通过示波器与频谱仪对生成的信号进行验证。

取正向调频连续波为具体例子进行说明,“反向”信号的变化与其类似,图 8(a)为正向调频连续波的时域测试结果,图 8(b)为频域测试结果。表 3 为测试汇总,由表可见:所测得两个信号的脉冲宽度均为 5 μs ,均与设定的脉冲宽度相同。测得两个信号的调频方向均与理论值相同。测得两个信号的调频范围分别为:490.265 173 MHz 和 489.779 334 MHz,与理论值 490 MHz 分别相差 0.265 173 MHz、0.220 666 MHz,误差分别为 0.54% 和 0.45%。综合看出测量出的线性调频信号,无论调频方向是正还是负,带宽值与理论值都较为接近,误差较小,且脉宽与设定一致,满足调频连续波的设计要求。



(a)“正方向”时域图
(a)“Positive direction” time domain diagram



(b)“正方向”频域图
(b)“Positive direction” frequency domain diagram

图 8 调频连续波测试图

射信号为二相码、四相码、八相码,码元长度均为 3,码元宽度均为 1.2 μs 。信号设置后通过示波器进行观察信号的编码类型、码元长度及码元宽度。

表 3 调频连续波参数测试数据

Table 3 Frequency modulated continuous wave parameter test data						
脉宽/ μs		调频方向		调频方向/MHz		误差/%
理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	
5	5	正方向	正方向	490	490.265 173	0.54
5	5	负方向	负方向	490	489.779 334	0.45

取二项编码为具体例子进行说明,其他相位编码变化与其类似,如图 9 所示。序号 1、2、3 分别指是第一、二码元的宽度以及总码元宽度,分别为 1.204、1.192、3.598 μs ,则根据均方根误差式(25)得到其均方根误差为 0.005 3。表 4 为测试汇总,由表 4 可知:所测得其余两种编码类型均与设置的相同。测得码元长度均为 3 个,均与设置的码元长度相同。测得四相编码的码元宽度分别为 1.194 0、1.196 0、1.204 μs ,均方根误差为 0.004 8,与设置的码元宽度相近。测得八相编码的码元宽度分别为 1.206、1.198、1.202 μs ,均方根误差为 0.003 8,与设置的码元宽度相近。综合看出测量出的相位编码信号都与理论值相符,满足相位编码的设计要求。

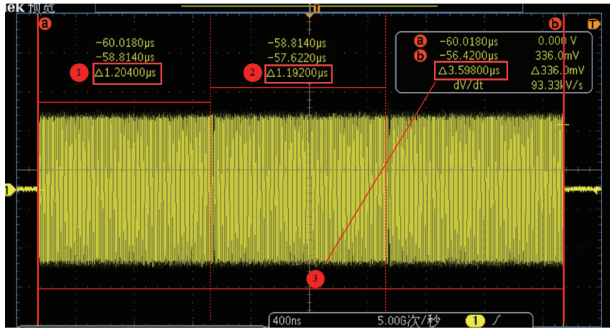


图 9 二相编码测试图

Fig. 9 Biphas encoded test diagram

Fig. 8 Frequency modulated continuous wave test diagram

实验分别设置雷达电子靶标工作在相位编码模式,发

表 4 相位编码参数测试数据

Table 4 Phase encoded parameter test data

编码类型		码元长度		码元宽度 1		码元宽度 2		码元宽度 3	
理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值
二相码	二相码	3	3	1.2	1.204	1.2	1.192	1.2	1.202
四相码	四相码	3	3	1.2	1.194	1.2	1.196	1.2	1.204
八相码	八相码	3	3	1.2	1.206	1.2	1.198	1.2	1.202

3.4 多体制雷达信号测试

为了验证电子靶标的多体制特性参数,针对多信号的应用需求,实验设置电子靶标选择重频参差、重频抖动、重

频捷变、相位编码等多种体制,共发射 16 个雷达信号对所设计的电子靶标的多体制雷达信号功能进行验证。将 16 个信号选择不同的载频,信号通过频谱仪后可观察到处于

不同频段上的 16 个尖峰。

由图 10 可得频谱仪上存在 16 组尖峰, 频率覆盖 500~700 MHz, 包含连续波、频率捷变、重频参差、线性调频等多体制信号, 体制序号与名称如图 10 所示。综上所述, 16 组信号的测量值均与理论设置值相同, 满足电子靶标多体制雷达信号设计要求。

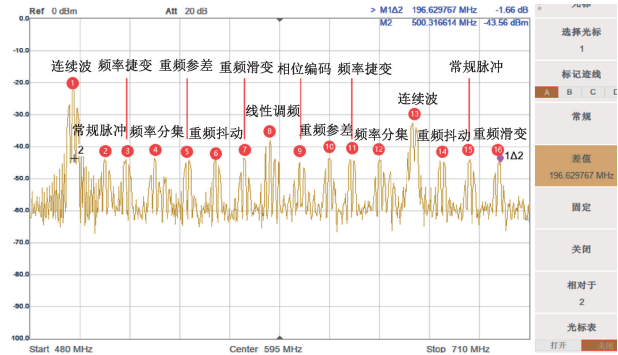


图 10 多体制雷达信号频谱图

Fig. 10 Multi-system radar signal spectrum diagram

4 结 论

本文设计了一种基于 ADRV9009 + FPGA 架构的雷达波形模拟电子靶标, 系统雷达算法采用模块化设计, 从捷变、重频等脉间特性与调频连续波等脉内特性入手, 开发雷达信号生成算法, 支持灵活扩展雷达数量, 并能够高精度设置 PRI、PW、瞬时带宽等参数, 精度可达 1 ns 或 1 MHz, 覆盖 75 MHz ~ 18 GHz 的发射频率范围和 400 MHz 的带宽范围。实验结果表明, 生成的雷达信号在时域上能够按设置要求准确生成信号的时间特性和脉冲形状, 在频域上表现出良好的频谱分辨率和带宽控制精度。相比其他雷达信号模拟器, 该靶标具有集成度高、功耗低、体积小、支持多种波形同时发射、精度高、频率调节范围广等特点, 显示出广泛的应用前景和推广价值。

参考文献

[1] 焦丽, 姚金杰, 王闽. 基于 3mm 雷达模拟器的多普勒测试[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 150-153.
JIAO L, YAO J J, WANG M. Doppler test based on 3mm radar simulator [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(6): 150-153.

[2] BROWN A D. Radar challenges, current solutions, and future advancements for the counter unmanned aerial systems mission [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2023, 38(9): 34-50.

[3] KHAWAJA W, SEMKIN V, RATYAL N I, et al. Threats from and countermeasures for unmanned aerial and underwater vehicles[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3896.

[4] 吴思奇, 赵晨, 陈泽宗. 舰载 S 波段测波雷达多带宽数

字下变频设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(10): 17-23.

WU S Q, ZHAO CH, CHEN Z Z. Design of multi-bandwidth digital down conversion of shipboard coherent S-band wave radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(10): 17-23.

[5] 朱保安, 何东越, 徐成前, 等. 雷达模拟器设计和实现[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(20): 115-117.

ZHU B AN, HE D Y, XU CH Q, et al. Design and implementation of radar simulator [J]. Computer Knowledge and Technology, 2022, 18(20): 115-117.

[6] 李鑫宇, 吕雅柔, 李媛媛, 等. 雷达回波模拟源发展现状 & 实现方法研究[J]. 信息技术与信息化, 2020(9): 136-139.

LI X Y, LYU Y R, LI Y Y, et al. Research on the development status and implementation methods of radar echo simulation source [J]. Information Technology and Informatization, 2020(9): 136-139.

[7] STRYDOM J J, DE WITT J J, CILLIERS J E. High range resolution X-band urban radar clutter model for a DRFM-based hardware in the loop radar environment simulator[C]. 2014 International Radar Conference. IEEE, 2014: 1-6.

[8] 任亚欣, 王瑞斌, 侯涛. 雷达回波模拟器的设计与实现[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(1): 98-101, 107.

REN Y X, WANG R B, HOU T. Design and implementation of a radar echo simulator [J]. Fire Control Radar Technology, 2021, 50(1): 98-101, 107.

[9] 张华童. 高性能雷达回波模拟器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.

ZHANG H T. The research of high-performance radar echo simulator [D]. Xi' an: Xidian University, 2017.

[10] BANTLE M, SCHUMACHER G. PC based real-time radar environment simulation [C]. 2016 17th International Radar Symposium (IRS), 2016: 1-3.

[11] 李宝鹏, 彭志刚, 王艳军, 赵文娟. 基于 VST-FPGA 的雷达侦察与干扰系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 181-187.

LI B P, PENG ZH G, WANG Y J, ZHAO W J. Design of radar reconnaissance and jamming system based on VST-FPGA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 181-187.

[12] 罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司. 复杂电磁环境雷达干扰模拟器的实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(7): 10-12, 18.

- ROHDE & SCHWARZ (China) Technology Co., Ltd. Implementation of radar jamming simulator in complex electromagnetic environment [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(7): 10-12, 18.
- [13] 李楚华. 多功能雷达信号模拟器[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- LI CH H. Multi-function radar signal emulator[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [14] CHEN W F, WU J, CHONG G G, et al. Research on broadband multi-channel signal processing based on ADRV9009 and ZYNQ[C]. 2024 20th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). IEEE, 2024: 1-8.
- [15] DELOS P, JONES M. Digital arrays using commercial transceivers: Noise, spurious, and linearity measurements[C]. 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST). IEEE, 2019: 1-5.
- [16] 刘俊杰, 郑沛, 赵忠凯. 基于 ADRV9009 的小型化雷达侦察干扰实现[J]. 电子信息对抗技术, 2022, 37(5): 14-18, 23.
- LIU J J, ZHENG P, ZHAO ZH K. Realization of miniature radar reconnaissance and jamming based on ADRV9009 [J]. Electronic Information Warfare Technology, 2022, 37(5): 14-18, 23.
- [17] 赵成义. 基于 ADRV9009 的雷达对抗系统设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- ZHAO CH Y. Design of radar countermeasure system based on ADRV9009[D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [18] HAO H L, ZENG D Z, GE P. Research on the method of smart noise jamming on pulse radar[C]. 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015: 1339-1342.
- [19] 占超, 蔡新举, 刘双青. 基于 AD9910 的雷达信号模拟器的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2015, 38(6): 41-43.
- ZHAN CH, CAI X J, LIU SH Q. Design and implementation of radar signal simulator based on AD9910[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(6): 41-43.

作者简介

白迪, 博士, 讲师, 主要研究方向为空间电磁频谱检测、无人机探测与反制。

E-mail: baidiwhu@126.com

梁肇龙, 硕士研究生, 主要研究方向为软件无线电。

E-mail: 2023120599@mail.scuec.edu.cn

崔勇强(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达系统及信号处理、无线通信及波形设计、电磁侦测及对抗技术。

E-mail: cuiyq@mail.scuec.edu.com

白立云, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电子侦察系统、通信信号处理。

E-mail: berkeleyb@163.com

黄韬, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电离层、热层及电子密度。

E-mail: 15002753268@139.com