

doi: 10.7690/bgzdh.2022.02.017

# 在线注入式战场复杂电磁环境仿真系统

兰 慧<sup>1</sup>, 侯建强<sup>1</sup>, 杨 辉<sup>1</sup>, 李 玲<sup>2</sup>

(1. 海军大连舰艇学院信息系统系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军大连舰艇学院基础部, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 为准确、科学、逼真地构建复杂战场电磁环境, 提出一种战术仿真与信号仿真相结合的复杂电磁环境构建新思路。依托半实物仿真技术, 采用计算机并行处理算法, 由远程导调与控制模块完成战术仿真的规划与设计, 利用可靠通信协议与战场电磁信号生成器完成信息实时交互, 实现复杂电磁环境信号的逼真模拟及在线注入。仿真结果表明: 该系统能模拟产生各种新体制、高稳定、高逼真的雷达辐射源信号, 系统功能强大, 操作简便, 具有重要的军事应用价值。

**关键词:** 战场环境; 电磁信号; 战术仿真; 在线注入

**中图分类号:** TJ01 **文献标志码:** A

## Online Injection Battlefield Complex Electromagnetic Environment Simulation System

Lan Hui<sup>1</sup>, Hou Jianqiang<sup>1</sup>, Yang Hui<sup>1</sup>, Li Ling<sup>2</sup>

(1. Department of Information System, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Department of Basic Course, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** In order to construct the complex battlefield electromagnetic environment accurately, scientifically and realistically, a new idea of constructing the complex electromagnetic environment based on the combination of tactical simulation and signal simulation is proposed. Based on the hardware-in-the-loop simulation technology, using the computer parallel processing algorithm, the remote director and control module completes the planning and design of tactical simulation, and uses the reliable communication protocol to complete the real-time information interaction with the battlefield electromagnetic signal generator, so as to realize the realistic simulation and online injection of complex electromagnetic environment signals. The simulation results show that the system can simulate the radar emitter signals of various new systems with high stability and high fidelity. The system is powerful and easy to operate, and has important military application value.

**Keywords:** battlefield environment; electromagnetic signal; tactical simulation; online injection

## 0 引言

随着电子技术在军事领域的广泛应用, 电子装备种类将更加繁多, 电磁信号将更加密集, 作战空间的电磁环境将更加复杂。如何准确、全面检验复杂电磁环境对装备威力的发挥、作战使用性能、作战效能的影响, 成为了研究的热点<sup>[1-2]</sup>。利用建模与仿真技术构建可重复、无风险、花费少的电磁环境开展装备性能检验是国内外普遍采用的方法。雷达是现代战场中不可或缺的电磁设备。如何将雷达辐射源信号逼真呈现, 是研究战场电磁环境仿真的重要内容。文献[3]利用矢量信号发生器和仿真软件, 搭建了复杂电磁环境信号半实物激励系统; 文献[4]基于脉冲流描述的方法, 采用数字仿真手段展现了战场环境的动态性和相对性; 文献[5-6]采用纯软件的方法产生作战环境中的典型复杂信号形式。现有

电磁环境建模方法形式多样, 但存在以下不足: 电磁环境构成要素分析不够完善, 电磁环境建模与作战场景间缺乏联系, 各种辐射源在不同战术运用下的动态综合效应无法展现。

针对以上问题, 笔者在分析复杂战场电磁环境特性的基础上, 构建了将战术推演与电磁信号生成有机结合的战场复杂电磁环境仿真系统, 提供逼真、动态、贴近于实战的电磁信号环境, 能为战场指挥、科学决策提供训练手段。

## 1 战场电磁环境特性

战场电磁环境是指在一定时空和频段范围内, 以空间自然环境为背景, 敌我双方多个电子设备辐射的电磁信号, 在空域、时域、频域、能量域上形成的多类型、高密度、宽频段、强对抗、动态交迭

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 军内科研课题(DJYJNKY 2017-016)

作者简介: 兰 慧(1988—), 女, 广西人, 硕士, 从事雷达信号处理研究。E-mail: lchongchong21@163.com。

的电磁信号环境，对装备战技术性能的发挥、装备保障及武器系统作战效能产生显著影响<sup>[7-8]</sup>。作战中，战场环境、装备种类、装备活动、战术原则的自身特点决定了战场电磁环境特性。

### 1.1 作战平台种类多

作战中，作战平台涉及水面舰艇、预警机、战斗机、导弹等，种类多、数量大、工作体制多样、分布发散，工作频段覆盖宽且有重叠；同时，作战平台机动性高，作战方式灵活多变，导致作战区域内电磁信号高度集中、样式复杂。

### 1.2 电磁环境信息实时变化

作战中，水面舰艇、飞机、导弹等作战平台均处于运动状态。平台运动根据预定战术呈现不确定性，导致平台辐射的电磁信号能量在空域随着时间发生变化；同时，为实现有效地侦察、搜索、跟踪、干扰，电子设备的开机时间、工作参数、干扰样式等均会发生变化，导致海战场中电磁信号环境在时域、空域、频域、能量域上呈现随机性和突变性。

### 1.3 对抗性突出

随着数字电子技术的发展，战场敌我双方对抗的强度和精准度不断增强。为获得战争胜利，敌我双方在作战空域内不断进行着隐身与反隐身、侦察与反侦察、干扰与反干扰、摧毁与反摧毁的较量，数字波束形成、相控阵、人工智能等新技术在作战中的运用，势必会让电子设备工作在更为复杂、多变、未知、多元的电磁信号环境中。

## 2 系统设计

### 2.1 系统组成

战场复杂电磁环境仿真系统采用半实物仿真方式来构建战场电磁环境，组成结构如图 1 所示。系统主要分为战术层仿真和信号层仿真 2 方面。战术层仿真由运行在高性能计算机上的远程导调与控制软件完成。远程导调与控制软件使用 C++ 语言，提供人机友好的交互界面，实现作战平台的战术设定，包括设定敌我双方战场态势信息、作战平台类型、战场环境参数以及战场数据存储记录和系统导演调度的功能。信号层仿真则由战场电磁信号生成器完成。战场电磁信号生成器采用 DSP+FPGA 架构，在远程导调与控制软件的控制下，利用宽带 DDS 技术产生多体制基带信号，通过滤波、上变频及功率放大，实时生成复杂、动态、逼真的电磁辐射信号，

通过辐射天线在线注入装备。整个系统中远程导调与控制软件、战场电磁信号生成器和装备形成一个无线闭环结构，有助于及时并快速地评估装备性能和战法决策的科学有效性，提高了效率。

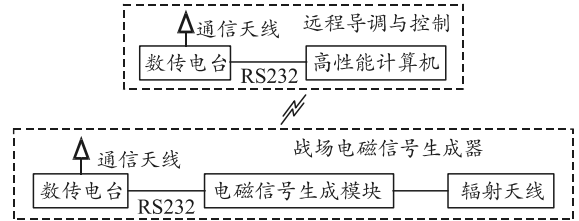


图 1 系统组成

### 2.2 系统工作流程

战场电磁环境仿真系统的工作过程由敌方虚拟兵力触发，分为战场环境规划阶段、运行阶段和评估分析阶段，其流程如图 2 所示。

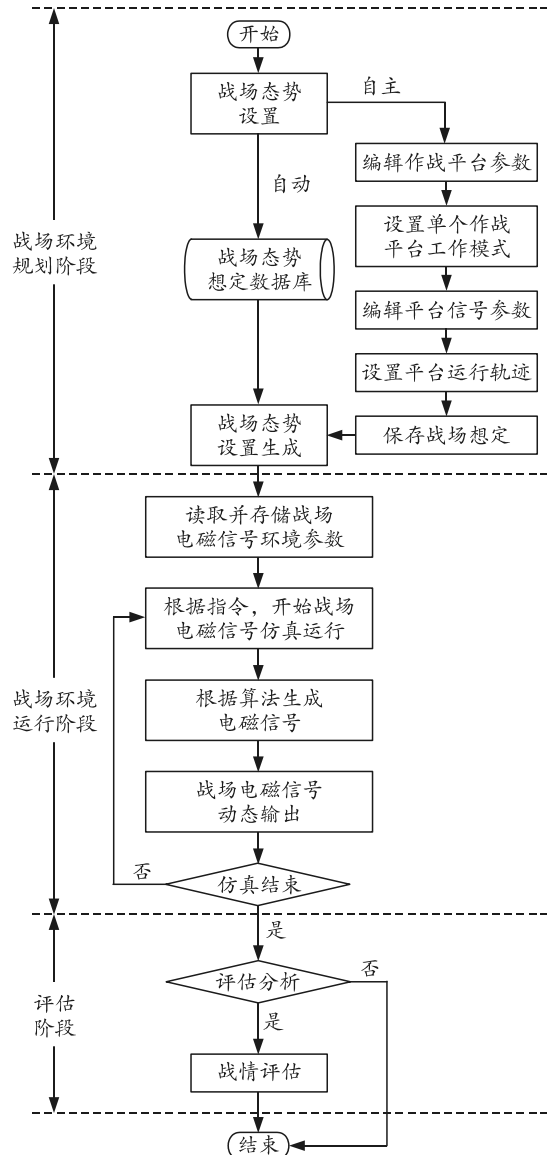


图 2 系统工作流程

### 1) 战场环境规划阶段。

战场环境规划阶段主要完成电磁环境仿真的准备工作，进行战场态势设定。战场态势既可自主设置，又可调用系统数据库来自动加载已存储的战场态势。战场参数包括作战平台类型、平台个数、空间位置、运行轨迹、运行时间等，每个作战平台还需设定如发射功率、信号样式、重复周期、天线扫描周期等平台参数，以及天气、海况等自然电磁环境参数，完成战场态势设置。

### 2) 战场环境运行阶段。

战场环境运行阶段主要完成战场电磁信号的生成。设置好的战场态势信息通过无线电台传输到战场电磁信号生成器，信号生成器接收到数据后读取作战平台类型、平台空间位置、信号频率、信号脉宽、重复频率等环境参数，由 DSP 存储并解析参数，依据信号生成算法控制 FPGA 实时动态生成复杂电磁信号，并按照预先设置的目标和平台速度、航向等运动参数计算位置信息，根据平台的作战状态进行干扰、搜索、跟踪等行为仿真，实现战场电磁信号环境的模拟仿真。

### 3) 评估分析阶段。

评估分析阶段主要完成战场电磁信号环境评估分析和存储 2 个过程。在完成电磁信号环境仿真后，作战平台可根据预先设置的战场态势信息，评估电子装备在模拟作战空域中所使用的抗干扰方法、目标探测能力、目标跟踪能力以及装备战技术性能，给出装备性能及战法可行性评估报告。同时，还可进行战场态势信息存储和记录，便于下一次电磁环境仿真能快速地完成战场态势信息设置。

## 2.3 仿真模型

系统采用信号级仿真的方法进行作战空域电磁环境仿真，利用基于脉冲信号描述字的电磁环境特征表征方法构建电磁环境仿真数学模型。脉冲信号参数一般可从时间、频段、空间、能量 4 个维度进行建模，笔者从以上方面对信号参数进行分析，构建并描述电磁信号的数学模型。

### 2.3.1 时间和频段维度

雷达脉冲信号的必要参数包括载频(RF)、脉宽(PW)、重复周期(PRI)，三者工作模式均包含固定模式、捷变模式和参差模式；因此，可将这 3 个参数进行统一建模。

#### 1) 固定模式。

固定模式下脉冲信号的 RF、PW 和 PRI 固定不

变，其描述如下：

$$S_i = S_0. \quad (1)$$

式中： $S_i$  为当前时刻脉冲信号的 RF、PW 和 PRI 三者中的任一； $S_0$  为固定状态时的取值。

#### 2) 捷变模式。

捷变模式下脉冲信号的 RF、PW 和 PRI 在不同脉冲重复周期期间快速变化，其描述如下：

$$S_i = S_{i-1} + \varepsilon_1 \cdot \Delta S + \varepsilon_2 \cdot \Phi. \quad (2)$$

式中： $S_i$  为当前时刻的取值； $S_{i-1}$  为上一时刻的取值； $\Delta S$  为脉间捷变量的最大值； $\Phi$  为随机抖动量； $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为在  $[-1, 1]$  间均匀分布的随机量。

#### 3) 参差模式。

设一个 CPI 中发射  $N$  个脉冲的信号，其各自状态取值为  $S_i$ ， $i=1, 2, \dots, N$ ，对应的参差变化量为  $\Delta S_i$ ，在每个发射点上发射  $M_i$  个脉冲。假设  $i_{n-1}$  为上一个脉冲的工作状态， $M_{n-1}$  是该脉冲状态下剩余的工作脉冲数，则初始状态下的脉冲工作状态  $i_1=1$ ，剩余的工作脉冲数为  $M_1$ 。

脉间参差模式是一个循环的过程，当前脉冲工作状态为  $i_n$ ，发射后剩余的工作脉冲数为  $M_n$ ，则两者满足以下条件：

$$i_n = \begin{cases} i_{n-1}, M_n = M_{n-1} - 1, & (M_{n-1} > 0) \\ i_{n-1} + 1, M_n = M_{n-1} - 1, & (M_{n-1} = 0, i_{n-1} < N) \\ 1, M_n = M_1 - 1, & (M_{n-1} = 0, i_{n-1} = N) \end{cases}. \quad (3)$$

则当前时刻脉冲的取值：

$$S_i = S_{i_n} + \varepsilon \cdot \Delta S_i. \quad (4)$$

### 2.3.2 空间维度

#### 1) DOA 模型。

脉冲到达角是信号辐射源与被试装备之间的夹角，由到达方位角和俯仰角构成。通过两者的坐标可以计算出 DOA 的值。取被试装备所在位置为坐标系原点， $x$  轴方向为正北方向， $x-z$  平面为水平方向， $x-y$  平面为垂直方向，信号辐射源在该坐标系下的位置坐标为  $(x_s, y_s, z_s)$ ，则脉冲到达方位角  $\alpha$  和俯仰角  $\beta$  可由下式进行计算：

$$\tan \alpha = z_s / x_s, \quad \tan \beta = y_s / \sqrt{x_s^2 + z_s^2}. \quad (5)$$

#### 2) 天线扫描方式。

信号辐射源天线按照一定的扫描方式对特定区域进行目标探测和目标测量。天线的扫描方式影响辐射源信号的幅度，常用的 3 种扫描方式为：圆周扫描、扇形扫描和圆锥扫描。

圆周扫描时，天线波束在方位上以辐射源所在位置为圆心做 360° 圆周扫描，在俯仰角上不进行扫描， $t$  时刻方位扫描角为：

$$\psi(t) = \psi_0 + \omega \cdot \text{mod}(t/T) \quad (6)$$

式中： $\psi$  为天线波束轴线初始方位角； $\omega$  为天线扫描速度； $\text{mod}(\cdot)$  为取余。

扇形扫描时，天线在方位上的某个特定区域内重复多次进行扫描，在俯仰角上进行逐行扫描。扇形扫描分单向扫描和双向扫描 2 种方式。单向扫描时，波束扫描朝着一个方向进行，则  $t$  时刻方位扫描角为：

$$\psi(t) = \psi_0 + \psi_{\max} \cdot \text{mod}(t/T) - 0.5\psi_{\max} \quad (7)$$

式中： $\psi_0$  为天线波束轴线初始方位角； $\psi_{\max}$  为天线波束在方位上的扫描范围； $T$  为天线波束扫描周期。

双向扫描时，天线波束在扫描范围内来回折返扫描，则  $t$  时刻方位扫描角表示为：

$$\psi(t) = \begin{cases} \psi_0 + 2\psi_{\max} \cdot \text{mod}(t/2T) - 0.5\psi_{\max}, & 0 \leq \text{mod}(t/2T) < 0.5 \\ \psi_0 - 2\psi_{\max} \cdot [\text{mod}(t/2T) - 0.5] + 0.5\psi_{\max}, & 0.5 \leq \text{mod}(t/2T) < 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\psi_0$  为天线波束轴线初始方位角； $\psi_{\max}$  为天线波束在方位上的扫描范围； $T$  为完成 1 次  $\psi_{\max}$  范围扫描所花的时间。

无论是单向扫描还是双向扫描，俯仰角上的扫描角均可表示为：

$$\theta(t) = \theta_{\max} \cdot \text{int}[N \text{mod}(t/NT)] \quad (9)$$

式中： $\theta_{\max}$  为天线波束在完成 1 次扇形扫描期间俯仰角增大的值； $N$  表示在俯仰上完成 1 次扫描的行数； $\text{int}(\cdot)$  为取整。

圆锥扫描就是水平上进行圆周扫描的同时进行俯仰上的扫描，方位扫描角与圆周扫描相似，俯仰扫描角与扇形扫描相似，这里就不再重复。

### 2.3.3 能量维度

由于作战平台处于运动状态，因此被试装备接收到的电磁信号幅度会发生变化。常用功率密度来表示被试装备接收到的信号能量强度。在被试装备处接收到的电磁信号功率密度为：

$$P_r = P_d G_d F(\theta) / 4\pi R(t)^2 L \quad (10)$$

式中： $P_d$  为辐射源电磁信号发射功率； $G_d$  为发射天线增益； $F(\theta)$  为归一化天线方向图函数； $L$  为电磁波大气传播衰减损耗； $\theta$  为辐射源与被试装备视线

方向与当前辐射源天线指向间的夹角； $R(t)$  为辐射源与被试装备之间的距离。在仿真过程中，当天线处于跟踪状态时， $F(\theta)$  为固定值；天线处于搜索状态时， $F(\theta)$  随着  $\theta$  的变化而变化， $R(t)$  与辐射源的运动速度和运动航迹有关均表征了电磁信号能量的时变性。

## 2.4 系统软硬件设计方案

### 2.4.1 远程导调与控制软件

远程导调与控制软件运行在高性能计算机上，采用 VC++ 语言在 Visual Studio 2018 环境中实现。其主要功能包括战场态势设置、作战环境参数设置、作战平台类型设置、作战平台运动状态设置；同时，还可以加载战场地图，能够更直观地显示战场整体态势。远程导调与控制软件采用结构化层次体系设计，顶层为用户层，主要提供友好易操作的战场态势设置界面，完成对战场态势信息的规划设置，同时支持系统设置和管理信号生成器运行；中间层为参数及数据报文管理，通过参数管理类、系统维护类、数据报文管理类、数据库管理类、串口管理类，将战场参数信息转换为字符、数组和数据链等统一形式，便于可靠传输；最底层为协议和 I/O 接口，应用数据库对战场环境参数进行存储和管理，根据通信协议生成通信数据包，以保证与战场电磁信号生成器间交互信息的可靠通信。

远程导调与控制软件设计结构如图 3 所示。

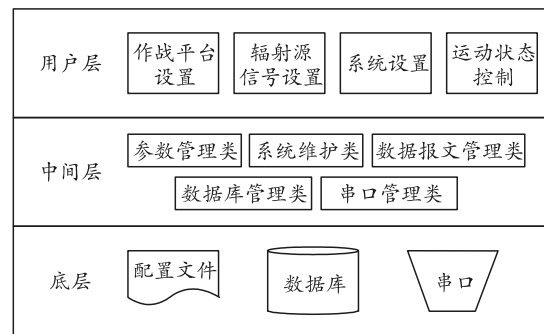


图 3 远程导调与控制软件设计结构

### 2.4.2 战场电磁信号生成器

战场电磁信号生成器是系统的核心，要求具有较高的实时处理能力，灵活性好、可靠性高；因此，信号生成器采用 DSP+FPGA 数字化架构，利用宽带 DDS 技术产生调频调相等多种形式的基带信号，经过上变频和功率放大，产生满足要求的射频信号并通过天线向被试装备辐射出去。战场电磁信号生成器结构如图 4 所示。

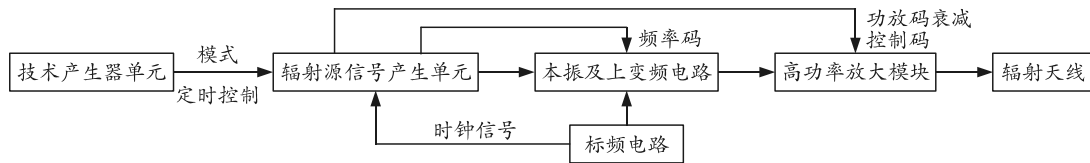


图 4 战场电磁信号生成器结构

技术产生器单元主要由 DSP 和 SDRAM 构成，负责与远程导调和控制软件通信，获取战场态势环境参数。DSP 接收到无线传输过来的信号数据和控制命令，解析报文获得辐射源信号的工作频率、脉冲宽度、重复间隔、信号带宽、调制样式、天线扫描方式、波束宽度、平台运动航迹等参数信息，在 FPGA 中断到来时，一次性将脉冲信号详细参数发送到 FPGA 的缓冲区，控制 FPGA 和 DDS 产生所需的基带信号。

辐射源信号产生单元主要由 DSP、大规模 FPGA、高速 ADC 构建的宽带 DDS 电路实现，具有调频、调相功能，负责产生带宽  $\geq 300$  MHz 的多种形式基带信号。宽带 DDS 组成如图 5 所示。

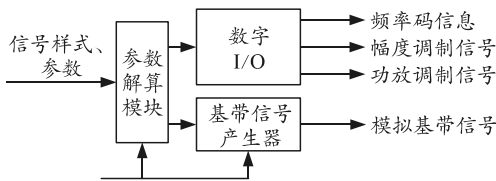


图 5 宽带 DDS 组成

宽带 DDS 单元主要由信号调制器 (PDW 解算模块)、信号波形发生器模块、控制接口电路等组成。宽带 DDS 单元接收模拟信号样式、参数，产生固定载频、线性调频、相位编码等基带信号，经上变频电路产生射频辐射信号。同时，还产生频率码、幅度控制码和功放调制码：频率码用于上变频电路中变频本振频率控制；幅度控制码用于宽带放大输出幅度控制，实现由天线扫描带来的信号功率调制模拟；功放调制码用于输出功放的电源调制，减小工作占空比。

标频电路由 100 MHz 的晶振为系统提供频率源基准信号，同时基准信号通过谐波产生器产生 1 GHz 的系统时钟信号。

本振及上变频电路主要产生系统所需本振信号。在辐射源信号产生单元提供的频率控制码的控制下，将标频电路输出的 100 MHz 频率源基准信号经过 PLL 频率合成器倍频产生所需的本振信号，在混频器内与经过滤波放大器滤除掉杂散频率分量的基带信号进行混频，上变频到所需的射频频段。

高功率放大模块对经过上变频的射频信号进行

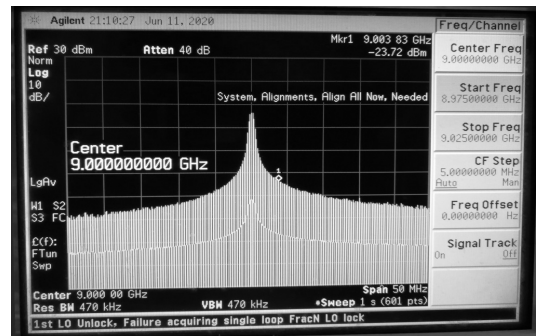
功率放大，输出达到功率要求的电磁信号。高功率放大电路中，由 6 bit 程控衰减器来控制信号幅度随天线扫描变化而呈现的动态变化，衰减步进能达到 0.5 dB。考虑设备小型化和电路性质，功率放大器采用 GaAs 宽带 MMIC 固态功放实现，输出功率  $P_o \geq 40$  dBm。

### 3 试验与仿真结果

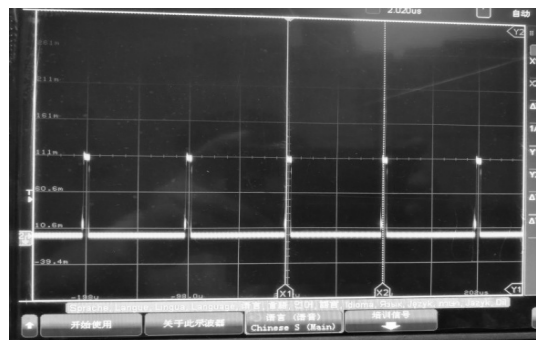
使用本仿真系统产生多体制雷达辐射源信号，在远程导调与控制软件中设置的信号参数如表 1 所示。用频谱分析仪监测信号的频谱特性，用示波器监测信号时域特性，得出试验结果如图 5—7 所示。

表 1 战场电磁环境信号参数列表

作战平台	信号类型	中心频率/GHz	调制参数
1	固定载频信号	9	脉宽：5 $\mu$ s 重复周期：100 $\mu$ s
2	线性调频信号	9.5	脉宽：5 $\mu$ s 重复周期：200 $\mu$ s 调制带宽：20 MHz
3	相位编码信号	9	调制类型：13 位巴克码 子码宽度：2 $\mu$ s 重复周期：500 $\mu$ s

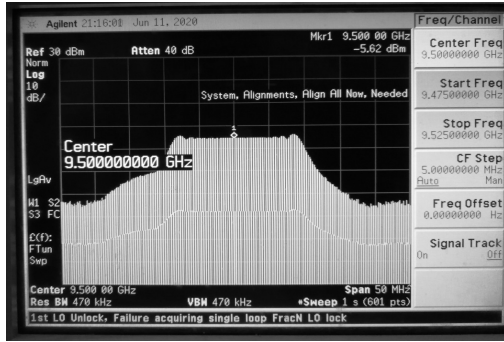


(a) 频谱

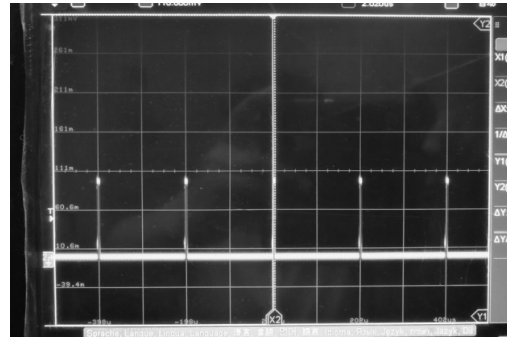


(b) 重复周期时域

图 5 固定载频信号

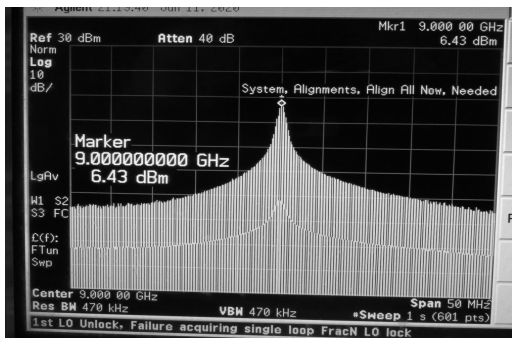


(a) 频谱

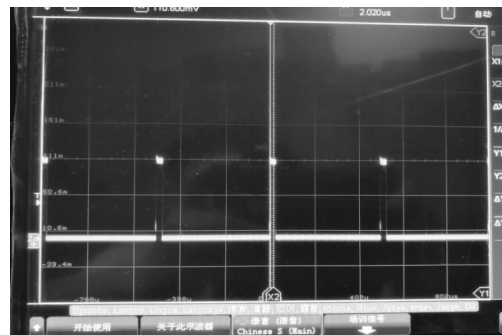


(b) 重复周期时域

图 6 线性调频信号



(a) 频谱



(b) 重复周期时域

图 7 相位编码信号

从图 5—7 可看出：该仿真系统能产生单载频、线性调频和相位编码等多种形式的雷达辐射源信号；用频谱分析仪和示波器对产生信号的中心载频和脉冲重复周期分别进行测量，测量结果同远程导调与控制软件中设置的信号参数相一致，说明系统能可靠地模拟生成不同体制多平台雷达辐射信号。

#### 4 结束语

笔者采用战术仿真与信号仿真相结合的方法，提出一种战场电磁环境构建新思路。利用远程控制软件，该系统能根据预设的作战平台参数，控制战场电磁信号生成器模拟产生多体制、高可靠、高逼真度的电磁信号，既能对电子装备的性能进行检验，又可用于指挥员的科学决策训练。

#### 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(3): 406-412.  
 [2] 王然, 闫抒升, 贺照辉, 等. 一种基于半实物仿真的雷达模拟器设计[J]. 空军预警学院学报, 2018(4): 276-279.  
 [3] 邵康, 刘姜玲. 基于半实物平台的战场复杂电磁环境信号生成与实现[J]. 中国电子科学研究院学报, 2017(2): 176-180.  
 [4] 赵晶, 刘义, 来庆福, 等. 防空作战电磁环境建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2012(2): 258-262.  
 [5] 张晓东, 李想. 复杂电磁环境脉冲编辑软件设计与实现[J]. 测控技术, 2020(11): 91-96.  
 [6] 周珊珊. 复杂雷达信号环境模拟与主控软件设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.  
 [7] 刘娜, 时海, 杨建华. 虚拟战场电磁环境雷达信号建模方法[J]. 指挥控制与仿真, 2007(6): 98-102.  
 [8] 王国玉, 汪连栋, 王国良, 等. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.