

# 一种雷达脉内特征仿真验证系统

陈正宁 张金全

(91336 部队 秦皇岛 066326)

**摘要:**为检验电子战系统的脉内特征分析能力,需构建逼真的雷达脉内特征仿真信号环境。针对脉内特征仿真信号环境构建中的仿真建模与验证问题,基于“FPGA+DA”硬件架构建立脉内特征仿真建模平台,以混合域示波器作为核心部件建立模型验证平台,从而构建一种雷达脉内特征仿真验证系统,对系统设计思路、组成与工作流程以及关键技术进行论述,设计实现的仿真验证系统能够有效的完成脉内特征信号仿真建模,并能对建立的信号仿真模型进行脉内特征的逼真性检验。

**关键词:**脉内特征;中频采集;混合域示波器

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

## Kind of radar intra-pulse features simulation and validation system

Chen Zhengning Zhang Jinquan

(No. 91336 Troop of PLA, Qinhuangdao 066326, China)

**Abstract:**In order to test an EW system intra-pulse features analysis capability, we need construct realistic radar intra-pulse feature signal environment. This paper aimed at the modeling and the validation of intra-pulse features signal environment simulation, based on “FPGA+DA”construct the modeling plat of intra-pulse feature, use mixed domain oscilloscopes as a core component, construct a kind of radar intra-pulse features simulation and validation system. This paper described the design idea, system composing, working flow, key technique. The system can verify fidelity of simulant intra-pulse feature signal environment.

**Keywords:** intra-pulse features;intermediate frequencyacquisition;mixed domain oscilloscopes

### 1 引言

雷达信号脉内特征(脉内信号调制方式)分析能力是现代电子战系统作战能力的一个重要表征。在检验电子战系统的雷达信号脉内特征分析能力时,需要根据实际战场环境构建逼真的雷达脉内特征信号环境。随着微波、电子信息技术的不断进步,新体制雷达采用的信号波形调制样式更加灵活,参数日益多变<sup>[1]</sup>,快速高效的开展雷达信号脉内特征建模和验证是当前雷达电子战系统性能检验的一项重要工作。

为了完成雷达信号脉内特征建模与验证,通常采用专门的硬件电路实现的雷达脉内特征模型较为单一且不可修改;而采用专用的信号接收机去完成对脉内特征的分析与识别,成本较高且分析能力有限。本文构建的雷达脉内特征仿真验证系统,利用 MATLAB、System Vue 等模型开发工具能够快速完成雷达信号脉内特征建模,采用

System Generator 环境基于 FPGA 进行模型实现能够完成模型的定制化建模,并利用价格相对低廉的混合域示波器作为信号采集装置,通过配置脉内特征分析软件完成对建立的仿真模型的有效验证。

### 2 雷达脉内特征半实物仿真

当前对雷达信号环境仿真的方法分为信号仿真和功能仿真两大类<sup>[2]</sup>,其中信号仿真对幅度和相位信息的仿真,功能仿真只是针对信号幅度信息进行仿真。雷达脉内特征仿真需要对雷达信号幅度和相位信息进行仿真,属于信号仿真;而采用信号发生器硬件,基于雷达脉内特征信号描述模型的半实物仿真手段是一种较为有效的雷达脉内特征信号仿真实现方法。

#### 2.1 雷达脉内特征半实物仿真系统

典型的雷达脉内特征半实物仿真系统组成如图 1 所示。

收稿日期:2016-03

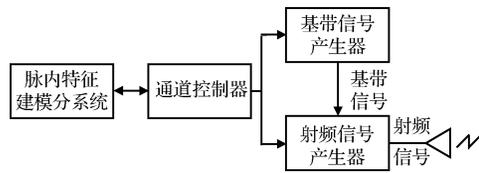


图1 雷达脉内特征半实物仿真系统

脉内特征建模分系统是一套由计算机设备和建模软件构成的模型构建与解析系统,采用“场景编辑+脉内特征建模+模型解析数据产生”的模式进行工作<sup>[3]</sup>。首先根据模拟的战场环境进行场景编辑,对雷达辐射源的主要参数进行设置;然后根据场景编辑的参数对雷达脉内特征进行信号建模,主要完成场景参数与模型数据交互,雷达信号脉内特征模型建模,并将建立的仿真模型入库;最后依据与通道控制器的接口关系对仿真模型进行解析,将仿真模型数据转换成通道控制器的预处理数据,为后续信号产生提供数据支撑。

通道控制器一般由 DSP、FPGA 等构成<sup>[3]</sup>,主要完成与脉内特征建模分系统的数据交互、模型解析数据的实时计算以及控制信号的实时生成等功能,是脉内特征信号产生的控制核心。

基带信号发生器一般由 DDS 器件<sup>[3]</sup>或基于高性能 DA 芯片的任意波形产生器构成,主要产生带有脉内特征信息的低频段基带信号,为后续射频信号生成提供基带信号。

射频信号产生器一般由射频放大器、开关电路、混频滤波模块、功率控制模块、发射调理模块等组成,主要完成基带信号的上变频,并对生成的射频信号进行频率滤波、功率调制及波形调理等,为信号接收设备提供射频信号。

## 2.2 雷达脉内特征信号建模方法与流程

常见雷达信号脉内特征如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 雷达脉内特征描述

调制类型	调制方式	信号特征
频率调制	线性调频	频率随时间呈线性变化
	频率编码	频率随时间按编码规律变化
	非线性调频	频率随时间按一定的非线性规律(如正弦波、三角波、锯齿波等)变化
相位调制	二相编码	脉内信号相位依据编码规律按 0°、180°两个相位角度进行交替变化
	多相编码	脉内信号相位依据编码规律按多个相位角度进行交替变化
混合调制	相位编码与频率调制混合	按照相位编码规律进行相位调制,每个码元内部频率按照频率调制规律进行变化

依据雷达信号特征采用合适的建模工具完成信号建模是雷达脉内特征半实物仿真的关键和基础。目前常用的建模工具有 MATLAB、System Vue 等,而 System Generator 等作为高性能的 DSP 系统快速建模与实现工具,是一种基于模型设计的工具,在 MATLAB/Simulink 环境下通过搭建基带信号产生系统的算法模型,然后将基带算法模型生成可硬件实现的工程代码,形成了高层数字系统设计到 FPGA 硬件实现的桥梁<sup>[5]</sup>,可在 MATLAB/Simulink 环境下对雷达信号脉冲特征进行图形化建模和仿真。为了完成雷达信号波形半实物仿真,采用如图2所示流程构建了雷达信号波形仿真模型库。

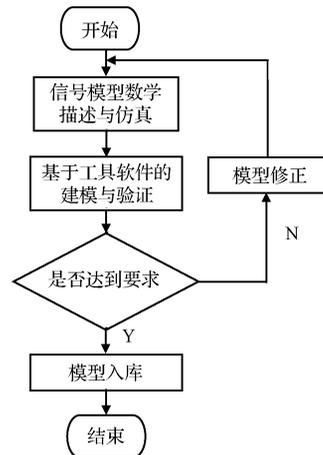


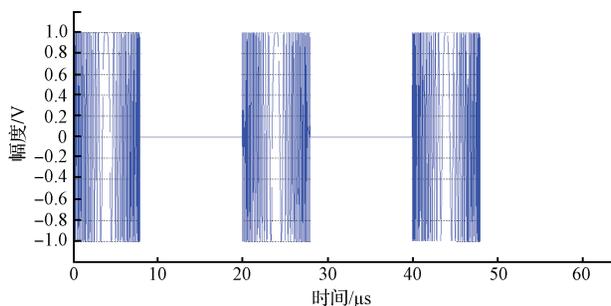
图2 雷达信号波形建模流程

首先基于 MATLAB、System Vue 等建模工具对需要仿真的雷达信号波形进行数学描述和仿真,重点对雷达信号的脉内细微特征进行描述和仿真,选定关键参数和系数;然后基于 System Generator 环境对模型进行 FPGA 实现<sup>[5]</sup>,利用半实物可编程信号仿真器产生信号,并完成信号模型分析与验证,若满足设计要求则将信号波形模型入库以备仿真训练时调用,如不满足设计要求则对模型进行修正和重新设计验证。

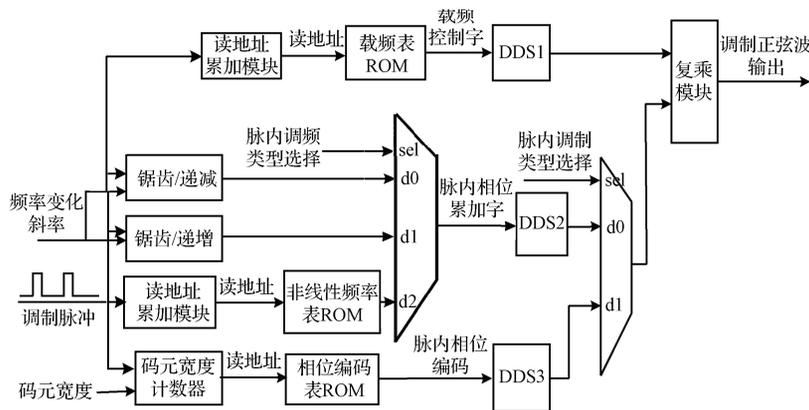
如图3所示,图(a)是采用 MATLAB 对脉内线性调频信号的数学描述。图(b)是依据数学描述结果,基于 FPGA 实现的脉内调频信号逻辑电路设计。

## 3 验证分析系统设计与实现

如上所述,雷达脉内特征建模是雷达脉内特征半实物仿真的关键所在,模型描述的正确与否直接关系到仿真产生的雷达脉内特征信号的正确性,模型描述的逼真度也直接决定了半实物仿真系统生成的雷达信号环境的逼真性。因此建立仿真模型验证分析系统是进行仿真模型逼真度检验的有效手段。



(a) 线性调频信号时域仿真波形



(b) FPGA实现的逻辑电路

图3 信号波形建模与FPGA实现示例

### 3.1 雷达情报侦察系统组成与工作机理

雷达情报侦察系统的基本组成如图4所示。

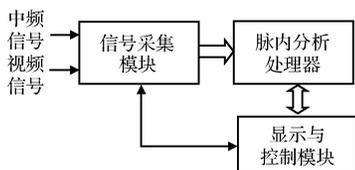


图4 雷达情报侦察实装基本组成

1) 信号采集模块在视频信号同步控制下对射频前端下变频输出的中频信号进行采集,该模块一般采用高速高精度AD变化器件<sup>[6]</sup>并配置一定容量的存储空间,是雷达情报侦察装备的核心部件,其性能指标直接决定了装备的情报侦察分析能力;

2) 脉内分析处理器主要是将信号采集模块采集的信息通过一定的算法进行信号处理,从而得到脉内的信息参数;

3) 显示与控制模块是系统的人机交互界面,主要完成雷达情报侦察分析控制以及分析结果的多样式显示等功能。

雷达情报侦察系统的工作机理是:在显示控制模块的统一配置和操作下,由信号采集模块对侦收和下变频得到的中频信号进行采集和变换,为后续信号处理提供输入信号;脉内分析处理器基于合适的硬件结构采用相关算法对采

集的中频信号进行分析处理得到信号所需的时域、频域、调制域特征参数,并将处理结果送至显示控制模块进行显示。

### 3.2 验证分析系统设计

#### 3.2.1 设计思路

雷达脉内特征仿真验证分析系统的基本设计思路是:基于实际装备的工作原理及流程,采用“结构等效、功能映射”的设计思想,以泰克仪器公司的混合域示波器MDO4054B-3作为核心部件,依据雷达情报侦察分析算法编制模型验证分析软件,以实现雷达情报侦察信号模型验证分析。

#### 3.2.2 系统组成

雷达脉内特征仿真验证分析系统组成如图5所示。

图中雷达脉内特征半实物仿真系统模拟产生的具有雷达脉内特征的射频信号一分为二。一路经过检波器形成雷达信号的脉冲包络信号,用于系统工作同步脉冲;另一路则直接进入混合域示波器的射频通道供后续的信号采集与处理使用。

混合域示波器是一种能够用于时域和频域、在数字信号、模拟信号和RF射频信号之间同时进行时间相关测量的仪器,具备示波器、频谱仪、数字信号分析仪等多域信号测量分析能力。在本系统中主要用于完成雷达信号的采集与变换,能将雷达脉内特征半实物仿真系统模拟产生的雷达信号通过变频、AD变换等手段直接输出为I、Q两路数字信号。

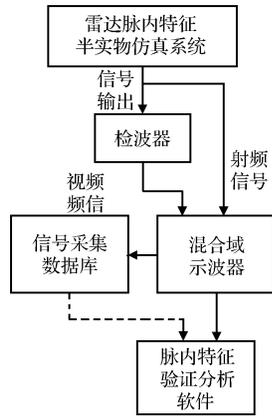


图5 雷达脉内特征仿真验证分析系统组成

脉内特征分析验证软件采用数字信号处理的方法对 I、Q 两路数字信号进行分析与处理<sup>[7]</sup>，从而得到雷达信号脉内特征。具备两种输入接口：1) 直接读取混合域信号分析仪采集的数据，实现在线实时分析；2) 从信号采集数据库中通过读取数据文件进行信号分析与处理，实现离线式分析。

### 3.2.3 工作流程

雷达脉内特征仿真验证分析系统工作流程如图 6 所示。

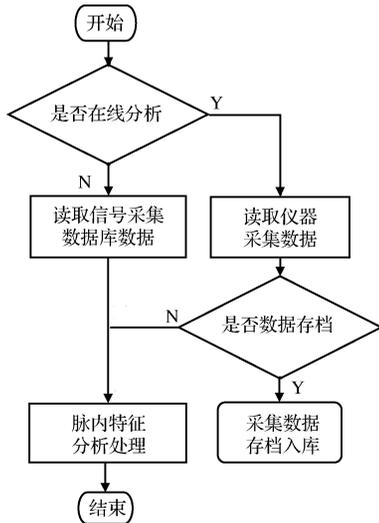


图6 系统工作流程

雷达脉内特征仿真验证分析系统具有两种工作模式：1) 在线分析模式，该模式下直接控制混合域示波器采集需要的波形数据，采集的数据可以通过存档操作存入信号采集数据库中供离线模式使用，也可以直接送入脉内特征验证分析软件中进行分析处理；2) 离线分析模式，该模式下可以脱离信号产生与采集的硬件环境，直接读取存储在采集数据库中的波形数据，并由脉内特征验证分析软件完成信号处理与分析。

## 3.3 关键技术及实现

### 3.3.1 基于数字 I/Q 的脉内特征分析

雷达信号脉内调制类型分析的基本处理流程：信号数字化——信号检测——信号变换——特征提取，在雷达脉内特征仿真验证分析系统中，信号数字化、信号检测均由混合域示波器完成，所以系统实现重点为信号变换、特征提取、分选识别 3 个方面。该系统主要采用基于时频分析的相位测频法，对采集到的数字化中频信息进行分析识别，具体方法步骤如图 7 所示。

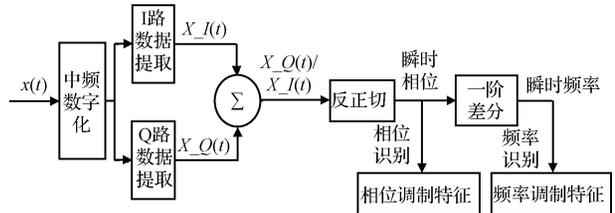


图7 信号分析处理流程

图 7 中对模拟的脉内特征信号进行中频数字化并形成 I、Q 两路数据由混合域示波器完成。脉内特征验证分析软件通过对采集到的 I、Q 数据进行求和，然后做反正切计算得到信号的瞬时相位，如图 8 所示为某次产生的脉内线性调频信号的瞬时相位特征。若是脉内相位调制信号则直接利用计算结果进行脉内相位调制特征分析，若是脉内频率调制信号则还需进一步进行一阶差分运算，从而进一步得到信号的瞬时频率以完成频率调制特征分析。如图 9 所示为是利用图 8 中的瞬时相位数据进行一阶差分计算的结果，可发现产生的脉内线性调频信号的线性调频特征明显，进而说明建立的脉内特征信号模型的正确性。

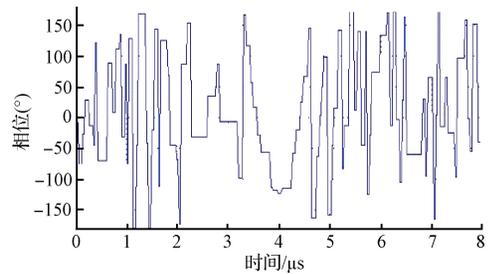


图8 瞬时相位

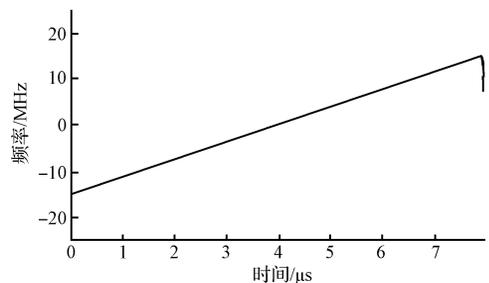


图9 瞬时频率

## 3.3.2 基于 COM 组件技术的软件开发

脉内特征验证与分析软件主要包括显控界面和脉内特征分析处理算法两大部分,其中显控软件作为人机交互界面采用 VC++ 开发环境并配置 QT、GL Studio 等界面开发与编辑工具,以达到显示的逼真性和控制的便捷性的目的;脉内特征分析处理算法则需要完成复杂的模型运算, MATLAB 以其强大数学运算开发能力使其成为该部分软件的首选开发环境。这样一来,在脉内特征验证与分析软件中需要使用多种编程开发环境,采用组件对象模型(component object model, COM)软件开发技术能够实现多种开发平台间的数据交互以及组件重用<sup>[8]</sup>。具有语言、平台无关性,可以方便软件升级、订制与替换,是较为理想的软件应用方案。脉内特征验证与分析软件需要开发的 COM 组件主要包括: I/Q 数据预处理组件、脉内特征分析组件、脉内特征识别组件、数据显示组件等。软件主界面如图 10 所示。

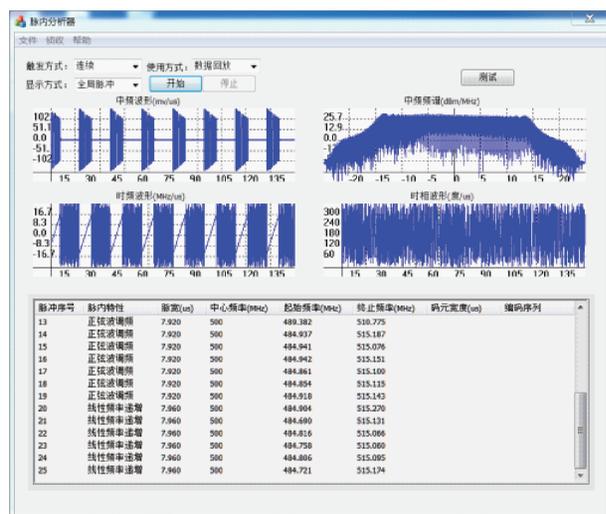


图 10 软件界面

## 4 结论

本文提出了一种雷达脉内特征仿真验证系统设计方法,基于 MATLAB 和 System Generator 工具软件完成了雷达脉内特征信号的快速、定制化建模,实现了雷达

脉内特征信号的半实物仿真;基于泰克仪器公司的混合域示波器 MDO4054B-3 实现了雷达脉内特征模拟信号的采集与变换,采用数字 I/Q 信号分析处理方法实现了雷达信号脉内特征分析与识别,运用 COM 组件技术开发了系统软件,实现了雷达脉内特征仿真验证分析。该方法是一种高效、高性价比的复杂电磁环境建模与验证方法,能够应用于雷达电子战系统性能检验相关技术开发。

## 参考文献

- [1] 余志斌. 基于脉内特征的雷达辐射源信号识别研究[D]. 成都:西南交通大学,2010:1-34.
- [2] 王国玉,汪连栋. 雷达电子战系统数学仿真与评估[M]. 北京:国防工业出版社,2004:217-219.
- [3] 侯俊利,黄波. 一种新的雷达信号环境模拟技术[J]. 电子信息对抗技术,2012,27(5):54-57.
- [4] 刘姝明. 雷达信号的脉内分析与识别算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2013:7-17.
- [5] 胡玉琛,刘一清. 基于 FPGA 的车牌识别系统研究与实现[J]. 电子测量技术,2015,38(12):54-58
- [6] 李云飞,宋虎,周希辰. 基于 System Generator 的数字下变频实现[J]. 雷达与对抗,2008(4):23-26.
- [7] 盛志超. 对 MIMO 雷达信号侦察和识别的研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2012:29-40.
- [8] 徐知. 中频数字化与矢量网络分析仪在脉冲状态下的测量[J]. 国外电子测量技术,2014,33(12):15-20.
- [9] 张德丰. MATLAB 与外部程序接口编程[M]. 北京:机械工业出版社,2009:101-120.
- [10] 曹菲,董显林. 基于 VB 和 GPIB 接口的阻抗分析仪及多功能万用表自动测试系统[J]. 计量技术,2006(3):6-8.
- [11] 宋吟龄. 雷达频率源自动测试系统软件设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(2):47-49.

## 作者简介

陈正宁,1980 年出生,男,本科,工程师。主要研究方向为雷达对抗仿真。

E-mail:4527011@qq.com