

基于 LabVIEW 的电磁环境信号模拟源软件设计

林帅 汪立新

(杭州电子科技大学通信工程学院 浙江 杭州 310018)

摘要 针对传统信号源信号类型单一、功能扩展性不足等问题,设计一款基于 LabVIEW 的电磁环境信号模拟源软件。通过采用模块化设计思想,使用混合编程方式建立信号数学模型,实现了信号的发生、叠加、显示及存储回放功能。测试结果表明,该软件能根据设置的场景参数,满足对常规通信、雷达、数据链、敌我识别等信号数据的仿真模拟需求,具有较高的可拓展性和应用价值。

关键词 信号模拟 LabVIEW 雷达 数据链 敌我识别

中图分类号 TP3 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.04.002

DESIGN OF ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT SIGNAL SIMULATION SOURCE SOFTWARE BASED ON LABVIEW

Lin Shuai Wang Lixin

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract In order to solve the problems of single signal type and insufficient function expansibility of traditional signal source, this paper designs an electromagnetic environment signal simulation source software based on LabVIEW. The software adopted modular design ideas and used mixed programming methods to establish the signal mathematical model, which realized the signal generation, superimposition, display, storage and playback functions. The test results show that the software meet the simulation requirements of signal data such as conventional communications, radar, data link, and IFF according to the set scene parameters, and it has high scalability and application value.

Keywords Signal simulation LabVIEW Radar Data link IFF

0 引言

随着通信技术的发展与各种技术装备的投入使用,传统功能种类单一、结构复杂的实物装备信号源已经不能满足信号接收设备在日益复杂的电磁环境中对多辐射源信号的测试验证需求。所以利用信号模拟源软件构建逼真的电磁环境信号,相比功能单一的实体信号源,不仅可以灵活便捷产生设备研发测试过程中所需要的各种信号,还可以极大降低研发成本,缩短研发周期^[1]。在电子信息设备开发测试,仿真实验教学等领域具有较高的需求和应用价值^[2]。

国内在信号源的软硬件设计方面已有一定研究,但在信号类型上较为单一,且在软件功能上对信号种类的拓展性不足。文献[3]针对雷达信号环境进行了

多种雷达脉冲信号数据仿真模拟。文献[4]设计了一种战场通信侦察电磁环境模拟软件,针对电磁环境中的通信类型信号进行了模拟生成。文献[5]基于 LabVIEW 平台实现了对航管雷达信号的仿真。文献[6]结合软硬件实现了对数据链信号的模拟发生,但只模拟生成了一种数据链信号类型。文献[7]设计了一种包含雷达辐射源和通信辐射源的通用电磁环境信号模拟器,具有一定应用价值。但以上研究只针对一种或两种信号类型进行了模拟,然而要逼真还原现实中复杂多样的电磁环境,就需要同时具备对多种信号的叠加模拟能力。

针对上述问题,本文设计的基于 LabVIEW 平台的电磁环境信号模拟源软件,实现了对常规通信、雷达、数据链和敌我识别四种类型信号的模拟生成,具备单信号模拟、多信号叠加模拟及存储回放

等功能。相比现有方法,本设计使用 MATLAB 脚本节点和模块化编程思想,具有可拓展性强和开发效率高的优点。

1 信号模型与理论基础

模拟电磁环境信号首先要建立信号的数学模型。根据设计需求,本软件模拟产生的主要信号类型有常规通信信号、雷达信号、数据链信号、敌我识别信号。常规通信信号主要包括模拟体制通信信号和数字体制通信信号两大类。本设计模拟的模拟体制通信信号包含调幅(AM)、调频(FM)、单边带(SSB)、双边带(DSB)等信号。数字体制通信信号包含幅度键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)、正交振幅调制(QAM)等信号^[8]。

1.1 雷达信号模型

雷达信号种类众多,从调制方法等可以分成不同种类。本设计中模拟了目前应用较多的三种典型雷达信号:常规脉冲信号,线性调频信号,相位编码信号。常规脉冲信号是一种常见并被广泛运用的雷达脉冲信号,通过脉冲信号发射及接收的时间可以确定目标所在的距离位置信息。信号模型如下:

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(2\pi f_0 t) \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(t/T)$ 是宽度为 T 的矩形脉冲调制函数; t 为信号采样时刻; f_0 为脉冲信号载频。

线性调频信号是指脉冲在持续时间内,频率连续变化的一种信号。因其具有较好的距离分辨率,常用于高性能雷达和声呐探测中。信号模型如下^[9]:

$$y(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(2\pi f_0 t + \pi K t^2) \quad (2)$$

式中: t 是信号采样时刻; K 是调频斜率; f_0 是信号的中心频率; $\text{rect}(t/T)$ 为宽度为 T 的矩形脉冲。

相位编码信号是雷达信号的一个重要类型,主要有二相编码信号和多相编码信号。以二相编码信号为例,二相指的是 $0, \pi$ 调相调制方式,它包括巴克码和 m 序列码等。巴克码是一种具有特殊规律的非周期序列,因其具有优良的自相关特性而被广泛应用在雷达中^[10]。因此设计中雷达相位编码信号选用巴克码进行实验。信号模型如下^[11]:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{P}} \sum_{k=0}^{p-1} C_k v(t - kT) & 0 < t < \Delta = PT \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v(t)$ 是子脉冲函数; T 是子脉冲的宽度; C_k 是第 k 个码元的值; P 为码长。

1.2 数据链信号模型

本设计中主要模拟 Link-11 和 Link-16 两种数据链信号波形。以 Link-16 数据链信号为例,Link-16 数据链消息发射的是成串的脉冲信号,每个脉冲间隙发射的信息构成一条消息。传输脉冲有单脉冲和双脉冲两种形式。其中单脉冲是基本传输脉冲形式,包括脉冲发送期和停止期共 $13 \mu\text{s}$ 。其中脉冲发送期时间为 $6.4 \mu\text{s}$,停止期时间为 $6.6 \mu\text{s}$ 。信源编码设计采用随机序列生成方式,经编码部分处理后使用 MSK 调制方式,采用跳频技术发射信号波形,提高了信号的抗干扰能力。传输信号波形的载频在 $960 \sim 1\,215 \text{ MHz}$ 内共 51 个频点上伪随机选取,共分布在三个分频段上: $969 \sim 1\,008 \text{ MHz}$ 上 14 个频点, $1\,053 \sim 1\,065 \text{ MHz}$ 上 5 个频点, $1\,113 \sim 1\,206 \text{ MHz}$ 上 32 个频点^[12]。频点之间最小间隔为 3 MHz,相邻的发射脉冲之间的跳频频率间隔要大于等于 30 MHz,跳频速率为 76 923 次/s。信号调制系统模型如图 1 所示。

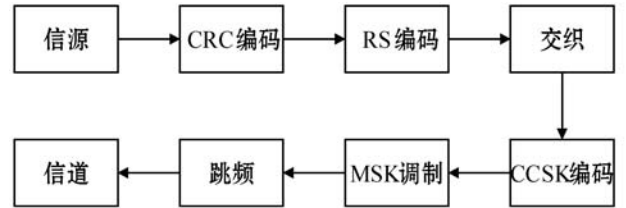


图 1 Link-16 信号调制系统模型框图

1.3 敌我识别信号模型

敌我识别信号简称 IFF 信号,主要用于飞机与地面站台间的相互识别,包含询问和应答两种格式。软件模拟了 MARK X 及 MARK XII 两种典型的 IFF 信号。以 MARK X 询问信号为例。MARK X 的询问信号包括模式 1、2、3/A、B、C、D,由一个 P1 脉冲、一个 P3 脉冲和一个旁瓣抑制脉冲 P2 组成,在不同的模式下 P1 脉冲与 P3 脉冲之间的时间间隔不同^[13]。信号的格式如图 2 所示。询问时,将对应的询问格式信号调制到 $1\,030 \text{ MHz}$ 频率的载波进行发射,相应发射应答信号的中心频率为 $1\,090 \text{ MHz}$ ^[14]。

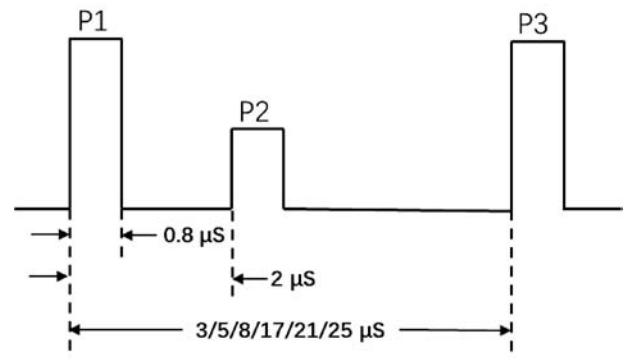


图 2 MARK X 询问信号格式

2 软件功能设计

2.1 整体结构

电磁环境信号模拟源软件基于 LabVIEW 开发,目的是将已有信号数学模型转换为可执行程序代码,从而实现对信号的模拟生成。软件整体结构如图 3 所示。设计上分为人机交互界面前面板、信号生成模块、信号叠加模块、显示模块、信号存储回放模块五大部分。人机交互界面前面板提供了场景参数设置和图形显示功能。信号生成模块按照不同的信号类型制式分为多个不同的子模块,这些子模块根据用户的输入参数,通过文本化的模型算法和 MATLAB 接口完成各种不同信号数据生成^[15]。要实现软件模拟信号种类的拓展,则需要添加新的信号生成子模块。信号叠加模块根据信号生成模块产生的数据,对不同采样频率及时间长度的信号叠加,实现对电磁环境中多种复杂信号的模拟功能。显示模块将叠加合成的信号数据进行时频域处理并在前面板界面显示。信号存储回放模块则实现对生成信号数据的本地存储及回放显示功能。

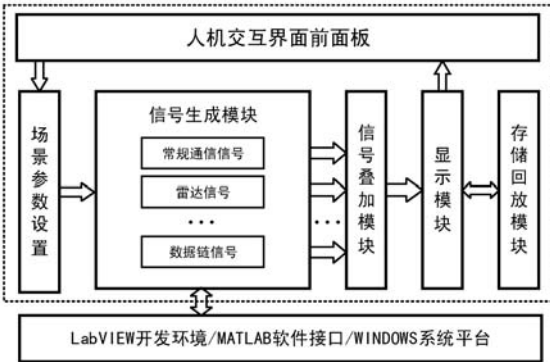


图 3 软件整体结构

2.2 交互界面设计

LabVIEW 在设计上分为前面板 UI 界面和程序框图界面^[16]。前面板 UI 界面提供了丰富多样的显示控件,能便捷地设计美观的人机交互界面。软件前面板界面如图 4 所示。左侧为信号的显示界面,上方显示信号时域波形,下方显示信号频谱,通过界面左下角图形工具选板控件可以实现对应波形的放大、拖拽滑动等操作。右侧为参数设置及功能按钮区域,通过点击选项卡控件进行功能面板的切换,在“主控面板”界面为具体信号类型的控制开关按钮,可以选中一个或多个以实现单信号或多信号的模拟功能,当输出通道开启时对应面板信号状态灯常亮。切换到各信号类型面板界面时可对具体信号参数进行设置。点击界面右下方对应固定按钮可以实现信号波形的产生、清除、存储

和回放。界面整体设计借鉴于传统的实体信号源面板,方便用户选择设置信号参数以及观测信号。

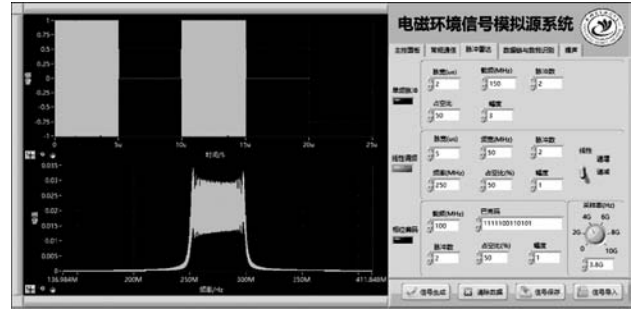


图 4 软件前面板界面

2.3 信号生成模块

信号生成模块是信号模拟源软件系统的核心,负责根据用户选择输入的信号参数格式如信号类型、频率、幅值、脉冲占空比、脉冲数等生成实际的波形数据。结合对不同信号模拟的需求以及不同仿真软件和编程语言的特性,选用 MATLAB 软件进行信号数据生成处理。MATLAB 软件在科学计算、信号处理和数值分析等方面具有较大优势,有利于提高信号模拟仿真过程中对大量数据的运算处理效率^[17]。如图 5 所示,以线性调频雷达脉冲信号生成子模块为例,在 LabVIEW 程序面板选择 MATLAB script 节点,将已通过仿真验证的程序代码插入节点中,根据程序添加相应的输入输出节点。再通过菜单中“创建子 VI”选项创建信号生成的子 VI 并设置图标,提高编程界面的简洁性。将子 VI 的输入输出节点与对应面板按钮的属性节点相连接,实现设置参数的输入与信号数据的输出,最后添加条件结构实现面板开关控制当前信号模块的运行状态,当输入的 Value 值为“真”时则子模块参与信号生成并输出数据,否则该子模块输出为空。

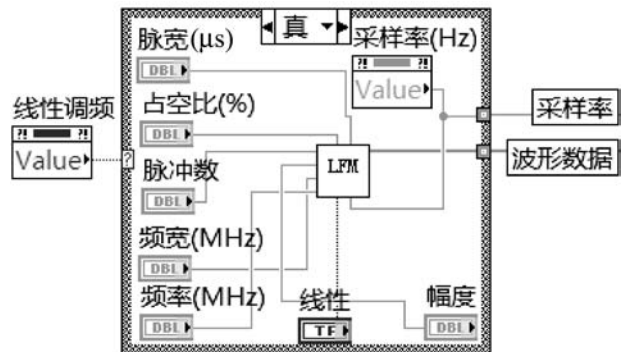


图 5 LFM 信号生成子模块

2.4 信号叠加模块

在复杂的电磁环境中往往存在多种辐射源,所以接收机接收到的是频率、功率、种类制式等不同的叠加信号。为了实现对多种辐射源信号的模拟,针对不同信号模拟生成过程中采样频率设置差异问题,本设计

中信号叠加子模块实现了对两种采样频率不同以及时间长度不同的任意波形信号数据的叠加合成功能。如图 3 所示,当信号叠加模块接收到信号生成模块产生的多个子信号时,则对多个子信号进行叠加处理,否则直接将单个信号送入显示模块。

具体实现方法为,对输入的 A 和 B 两路信号数据根据各自采样频率还原成波形,再根据 A 和 B 两者中较高的采样频率作为波形重采样频率,得到重采样后的两路信号波形数据。由于重采样前两路信号波形时间长度不一致,以同频率采样后得到的波形数组长度也将不同。故在对两路重采样后波形数据直接相加前需对较短数组数据进行补零,满足时间长度一致。实现流程如图 6 所示。将多个信号叠加子模块进行二次封装设计,实现三合一、四合一等任意通道数量信号波形的叠加,提高了程序复用率。程序功能的模块化有利于提高软件的可拓展性,通过结合信号生成模块实现了对单信号模拟、多信号叠加模拟功能的创新设计,同时有效减小了软件开发难度。

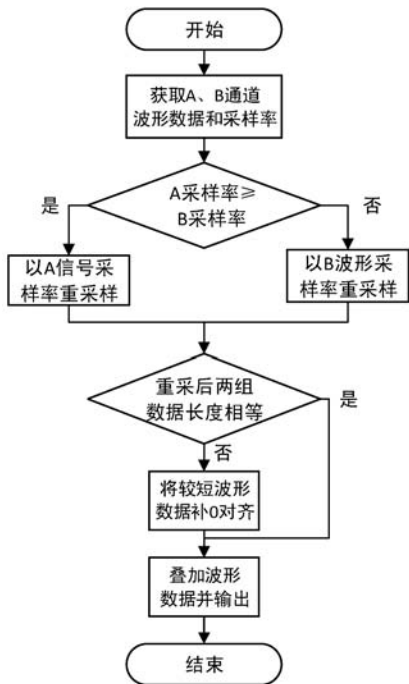


图 6 信号叠加模块实现流程

2.5 显示及存储回放模块

显示模块将经过信号叠加模块处理后的信号波形数据进行时域及频域展示,程序框图如图 7 所示。模块的输入端为信号的采样频率值以及信号的波形数组数据。对采样频率取倒数即为数据的采样时间间隔,以 $t=0$ s 为起始时间,按采样时间间隔将波形数据捆绑成波形簇输入波形图控件进行信号的时域显示。对于频谱图,将输入的波形数组数据首先经过 FFT 处理,采用复数至极坐标转换函数将输出分解提取幅值

数据,选取单边数据按采样点频率间隔 f/N 捆绑成波形簇进行频谱输出显示,其中: f 为采样频率, N 为采样点数。

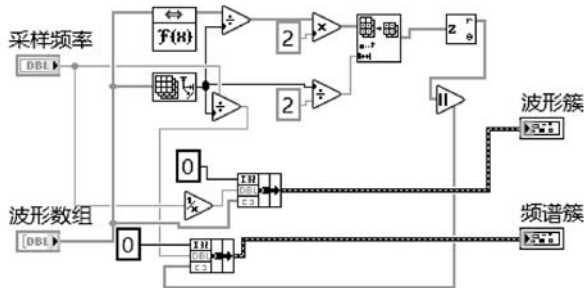


图 7 显示模块程序

存储回放模块实现对信号的回放显示功能。模块程序框图如图 8 所示。在 While 循环结构中加入两个事件结构,用于监测信号保存、导入按钮的状态,一旦按钮值改变则执行相应操作。当“信号保存”按钮值改变时,预先对当前显示数据长度判断,小于 0 则表示显示界面为空,弹出“信号数据为空”提示框,同时结束子程序模块。大于 0 时则弹出文件路径选择对话框,根据用户输入要保存的文件名及文件路径,以替换或创建方式打开文件,将显示界面生成的波形数据及采样信息转换成字符串按行顺序写入。当“信号导入”按钮值改变时,根据用户选择的文件以只读方式进行打开操作,通过引用句柄读取文本文件。将文本字符串按照写入格式转化为波形数组数据并提取采样信息,调用显示模块进行处理后送至波形图和频谱图的对应属性节点完成回放显示。

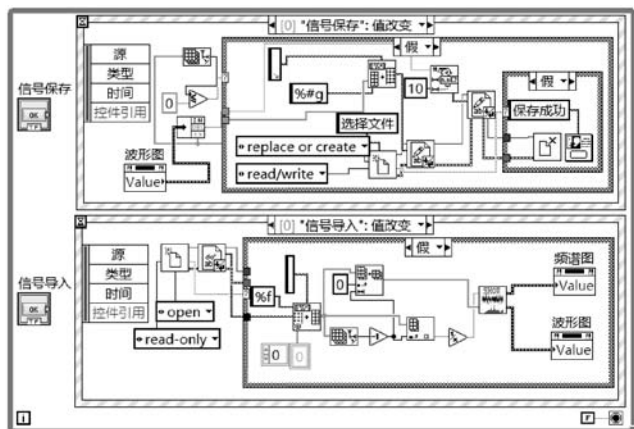


图 8 存储回放模块程序

3 软件测试与验证

为验证软件对单信号模拟和多信号叠加模拟两种主要功能,设置不同参数进行信号的模拟生成测试。通过观察读取显示界面产生的信号波形,或将波形数据导入示波器或 MATLAB 软件中进行分析,

再与设置的参数值进行比较判断以验证信号的模拟生成能力。

3.1 单信号模拟测试

分别选取雷达和通信两种不同类型的电磁环境信号进行单独验证测试。信号主要参数设置如表 1 所示。

表 1 信号主要参数设置信息

信号	参数类型	参数值
通信信号	通信信号类型	数字
	调制方式	QAM
	进制	16
	载波频率/Hz	50
	生成时长/s	1
	波特率/Baud	10
雷达信号	雷达信号类型	线性调频脉冲
	脉冲宽度/ μs	2
	信号载频/MHz	400
	占空比/%	20
	调制带宽/MHz	50
	脉冲个数	2
	线性调频方式	递增

按参数进行设置,生成信号后将结果从软件导出,从图 9、图 10 看出 16QAM 通信信号波形基带码元宽度为 0.1 s,在一个码元宽度内存在五个载波周期,且信号中心频率为 50 Hz,与设置值一致。从图 11、图 12 看出雷达信号脉冲宽度为 2 μs ,脉冲重复周期为 10 μs ,占空比为 0.2。频率范围在 400 至 450 MHz 区间,满足线性调频脉冲信号参数设置范围。

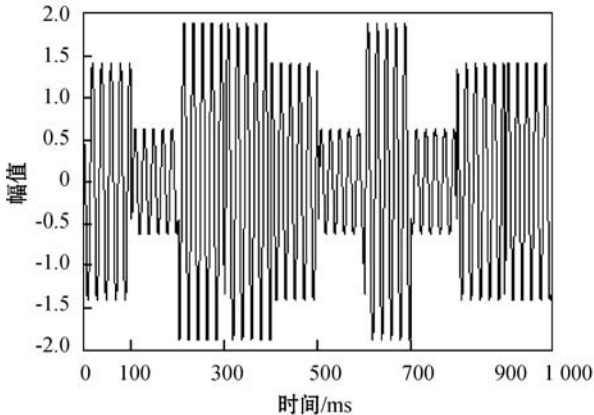


图 9 通信信号时域观测

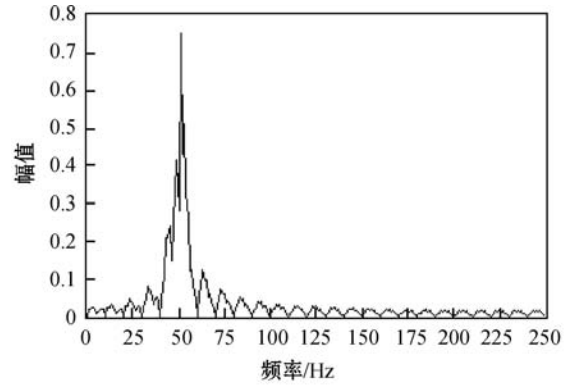


图 10 通信信号频域观测

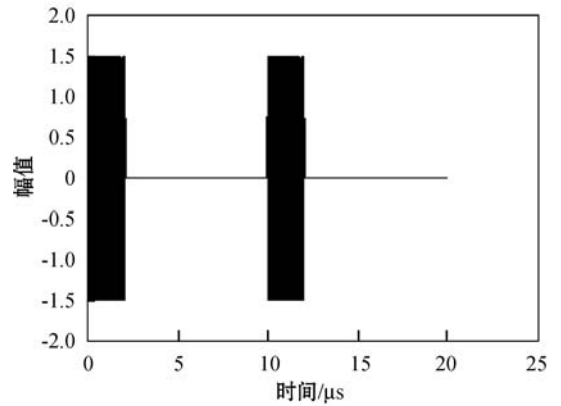


图 11 雷达信号时域观测

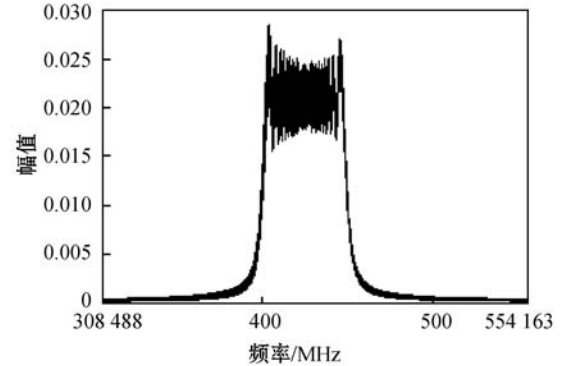


图 12 雷达信号频域观测

3.2 多信号叠加模拟测试

测试软件对复杂电磁环境中多类型信号模拟构建能力,选取数据链信号和敌我识别信号且同时叠加噪声进行测试,验证叠加生成的信号波形是否正确。选取信号类型及主要参数如表 2 所示。

表 2 叠加信号类型及主要参数

叠加信号	参数名称	参数值
数据链信号	信号类型	Link-16
	封装格式	单脉冲
	脉冲个数	100
	跳频点数	51
	起始时间/ μs	0

续表 2

叠加信号	参数名称	参数值
敌我识别信号	信号类型	MARK X
	询问模式	Mode C
	应答状态	关
	起始时间/ μs	2
噪声信号	类型	均匀白噪声

在主控面板中将几种对应信号通道开关打开,点击选项卡切换至各信号参数设置面板,按表中参数设置,点击“信号生成”按钮生成叠加信号时域波形及频谱图。结果从软件导出,并将波形进行放大观测,如图 13 所示,可以看出,时间 $t=0\text{ s}$ 处开始,在 $0\sim 6.4\ \mu\text{s}$ 间叠加有数据链、敌我识别及噪声三种信号,单个数据链信号脉冲信号的持续时间长度为 $6.4\ \mu\text{s}$,在 $6.4\sim 13\ \mu\text{s}$ 之间为纯噪声信号,数据链信号脉冲之间的间隔为 $13\ \mu\text{s}$ 。敌我识别信号的起始时间为 $2\ \mu\text{s}$,P1 与 P2 脉冲间隔 $2\ \mu\text{s}$,P1 与 P3 脉冲间隔为 $21\ \mu\text{s}$,与设定的 MARK X 信号模式 C 理论值相符。从图 14 观察到 Link-16 数据链信号频率范围分布在 $970\sim 1\ 010\ \text{MHz}$ 、 $1\ 050\sim 1\ 070\ \text{MHz}$ 、 $1\ 110\sim 1\ 210\ \text{MHz}$ 三个范围区间,而敌我识别信号中的询问信号中心频率为 $1\ 030\ \text{MHz}$,均与理论参数及设置值一致。

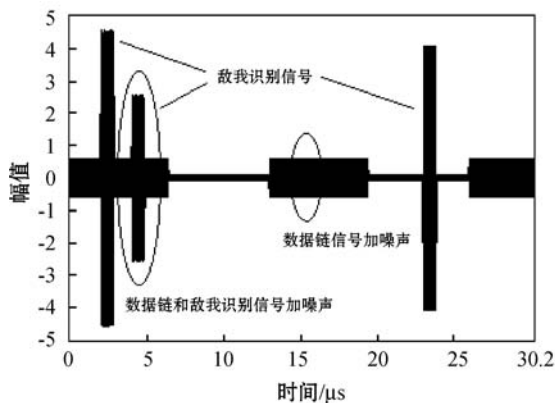


图 13 叠加信号时域观测

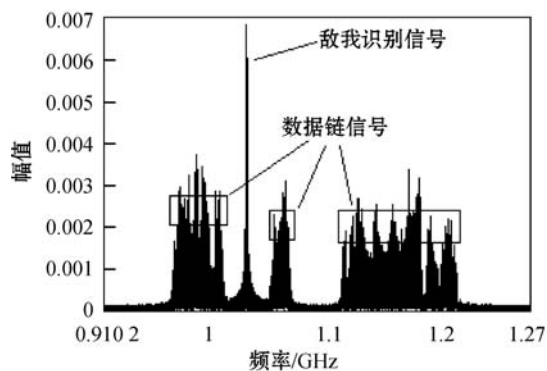


图 14 叠加信号频域观测

4 结 语

本文设计一款基于 LabVIEW 的电磁环境信号模拟源软件。该软件根据用户界面设置的各项参数,通过软件程序生成信号数据,实现了多种电磁环境信号的发生和叠加等测试,涵盖常规通信信号、雷达脉冲信号、数据链信号、敌我识别信号等常见电磁环境信号类型,测试结果均达到相应要求。通过结合 MATLAB 脚本节点和文本化算法进行信号模型构建,使软件具有功能拓展性强和开发效率高等优点,能够广泛应用于科研生产等领域,为设备测试验证、仿真研究提供了信号数据来源。由于电磁环境中信号复杂多样,后续将在已支持的信号类型基础上加入更多信号类型库,并结合硬件实现信号生成。

参 考 文 献

- [1] 汪后虎. 基于 FPGA 的通信信号模拟器设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [2] 游敬云,赖兰剑. 电子战复杂电磁环境模拟技术[J]. 中国电子科学研究院学报,2014,9(5):517-520.
- [3] 石翔. 复杂信号环境动态模拟软件设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2014.
- [4] 沈振惠,张建华. 通信侦察电磁环境建模与模拟软件设计[J]. 指挥控制与仿真,2016,38(3):113-115,121.
- [5] 李东元. 基于 LabVIEW 和 Matlab 的航管雷达仿真系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2016.
- [6] 朱勇锋,周生奎,陈应兵,等. Link-16 数据链信号分析与模拟发生[J]. 电子质量,2019(5):77-81.
- [7] 杨静,张清原,黄真. 通用电磁环境信号模拟仪器设计与实现[J]. 太原理工大学学报,2016,47(2):200-206.
- [8] 杨博盛. 复杂电磁威胁信号环境模拟器的设计与实现[J]. 舰船电子对抗,2019,42(6):90-94,98.
- [9] 杨巍. 雷达信号模拟器软件的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [10] Soba J, Munir A, Suksmono A B. Barker code radar simulation for target range detection using software defined radio [C]//International Conference on Information Technology and Electrical Engineering,2013:271-276.
- [11] 钱国栋,李颖,朱庆彬. 一种正交二相编码信号抗干扰设计方法[J]. 雷达与对抗,2018,38(3):38-41.
- [12] 赵志勇,毛中阳,张嵩,等. 数据链系统与技术[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [13] 汪东雷. 基于 FPGA 的多模式信号源的研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学,2010.
- [14] 郭恒. 多目标模拟 IFF 信号源—基带信号生成单元系统设计[D]. 成都:电子科技大学,2014.

构支架安装工程(吊装及抬吊)施工作业B票”模板,模板将会自动填写部分信息。图8(c)为指定签审人员,系统将自动生成签审流程以及对应人员,用户亦可根据实际情况自行修改。



图8 作业票模板库

4.3 作业票管理展示

作业票管理如图9所示,图9(a)为当前所有负责的作业票列表,将会显示各个作业票的关键信息以及目前进行的阶段。图9(b)为作业票在签审阶段中的签审情况展示。图9(c)为作业票在施工阶段现场实施反馈展示以及施工人员展示,并有实时风险提示。

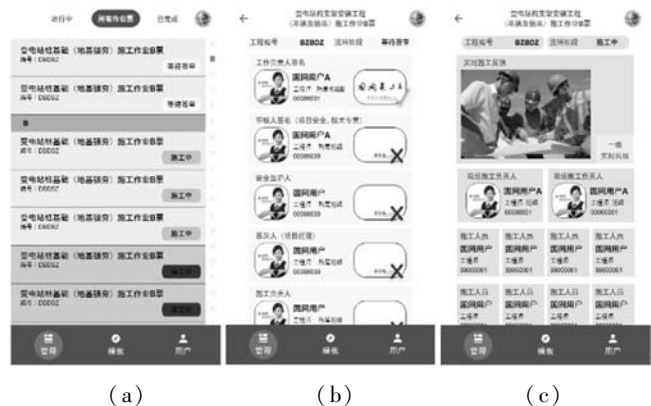


图9 作业票模板库

5 结语

本文设计的作业票管理系统基于跨平台移动终端以及分布式服务端技术,提供高效稳定的实时作业票服务;融合了基于人工智能的人脸识别以及签字验证技术,避免了代签、冒签现象的发生,实现了对工作流程的严格把控,同时提高了作业票的签审效率。系统对现场施工情况进行全过程的实时风险管控,保障了人员和设备安全。作业票的数字化也提高了后期管理人员进行分类统计、考核分析的效率和准确性。

目前该系统已在供电公司变电部投入运行,极大提高了作业票系统的运行效率。

参考文献

- [1] 王卫华. 工作票系统的研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [2] 冯红坤,赵全胜,胡伟,等. 基于终端机的变电站工作票全过程管理[J]. 电工电气,2018(12):61-64.
- [3] 陈裔生,蔡泽祥,尹亮,等. 变电检修管理一体化工作票研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005(6):67-70.
- [4] 严耿. 基于B/S构架的图形化智能电气工作票系统的研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [5] 曾厉,虞晨曦,刘海艳. 基于智能成票规则及算法的电气工作票系统[J]. 电工技术,2019(24):105-110.
- [6] 王坤,吴松,张永奈,等. 一种施工现场作业票数字化管理应用的设计与实现[J]. 机电信息,2020(2):102-103.
- [7] 罗国栋. 基于可信电子签名的热力工程项目管理系统[J]. 煤气与热力,2019,39(12):27-29,43.
- [8] 潘冰. 面向资源的RESTful Web应用研究[J]. 微计算机应用,2010,31(7):38-43.
- [9] 冯竹建,苏海智,陈荣. 电力供电大楼机房能耗监测与分析系统研究[J]. 能源与环境,2018,40(4):150-155,159.
- [10] 李娜. 基于Spring Cloud微服务架构的应用[J]. 电子技术与软件工程,2019(12):142.
- [11] Deng J K, Guo J, Ververas E, et al. RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020: 5202-5211.
- [12] Deng J K, Guo J, Zafeiriou S. ArcFace: Additive angular margin loss for deep face recognition[EB]. arXiv:1801.07698,2018.
- [13] Bromley J, Guyon I, Lecun Y, et al. Signature verification using a "Siamese" time delay neural network[C]//6th International Conference on Neural Information Processing Systems, 1993:737-744.
- [14] 滕阳阳,胡栋. 基于Netty的HTTP协议栈的扩展设计与实现[J]. 无线通信技术,2017,26(3):38-42.
- [15] 叶文胜. 利用Java技术动态生成Word文档之探索[J]. 黄冈职业技术学院学报,2019,21(6):123-125.

(上接第21页)

- [15] Kumar A, Singh N, Anshumali I. Simulation and interactive approach based demonstration of pulse compression technique in atmospheric radar[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(12):1255-1267.
- [16] 李林超,徐文龙,徐冰俏. 基于LabVIEW的心电监护仪自动检定系统的研发[J]. 计算机应用与软件,2018,35(8):128-132.
- [17] Zhang J G, Zhao X L. Design of the chaotic signal generator based on LABVIEW[J]. Sensors & Transducers, 2014, 163(1):135-140.