

杂波环境下雷达信号处理的 SystemVue 建模与仿真方法研究

尹园威¹, 刘月航¹, 解辉¹, 刘星²

(1. 陆军工程大学 石家庄校区, 石家庄 050003; 2. 河南省军区数据信息室, 郑州 450003)

摘要: 对雷达信号处理的仿真建模方法进行研究, 利用 SystemVue 仿真平台中专用的雷达模型库构建雷达系统仿真模型, 并对杂波环境下的雷达信号处理过程进行雷达系统的建模与仿真实现; 首先, 分析雷达回波生成过程及雷达信号处理的基本原理; 其次, 研究雷达仿真模型库中目标模型、杂波/噪声模型、脉冲压缩模型、MTD 模型、CFAR 模型的功能作用及参数设置; 最后, 利用 SystemVue 仿真平台搭建杂波环境下雷达系统仿真模型, 并基于矩阵类型的数据对雷达信号处理过程进行仿真; 经过仿真, 雷达系统模型的信号处理结果与理论相符, 验证了该仿真模型的正确性。

关键词: 雷达信号处理; 回波生成; 系统仿真; SystemVue; 杂波环境; 矩阵数据

System Vue Modeling and Simulation Study of Radar Signal Processing in Clutter Environment

Yin Yuanwei¹, Liu Yuehang¹, Xie Hui¹, Liu Xing²

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2. Henan Provincial Military Command Region Data Information Room, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The simulation modeling method of radar signal processing was studied, and the radar system simulation model was built with the special radar model library dedicated to the System Vue simulation platform. The radar signal processing process in clutter environment is modeled and simulated. Firstly, the process of radar echo generation and the basic principle of radar signal processing are analyzed. Secondly, the functions and parameter settings of target model, clutter/noise model, pulse compression model, MTD model and CFAR model in radar simulation model library are studied. Finally, the simulation model of radar system in clutter environment is built by using SystemVue simulation platform, and the radar signal processing process is simulated based on the data of matrix type. Through simulation, the signal processing results of the radar system model are consistent with the theory, which verifies the correctness of the simulation model.

Keywords: radar signal processing; echo generation; system simulation; system Vue; clutter environment; matrix data

0 引言

雷达工作的电磁环境越来越复杂, 充斥着各种杂波、噪声及干扰, 如何从回波中提取到有效信息, 准确、快速地检测到目标就显的至关重要。为了解决这一问题, 各种先进的雷达信号处理技术不断应用于雷达设计中, 导致雷达信号处理系统越来越复杂, 如何在雷达上合理的应用不同的雷达信号处理技术就成了雷达研制人员必须解决的问题。

在一部雷达的设计中运用仿真技术可以有效地解决这一问题。随着计算机性能的提高及数字化装备的普及, 数字仿真逼真程度不断提高, 以其速度快、成本低、可操作性高的优点, 成为雷达仿真中最常用的手段。在数字仿真中, 可用于雷达仿真的软件有很多。但大多数仿真软件存在一些显而易见的缺点, 如执行速度慢, 不能生成可执行

文件, 雷达专业模型库极不完备, 需要结合其他软件才能实现端口控制和实时控制等, 其仿真工作量、难度不亚于雷达设计工作本身, 尤其是该仿真平台很难生成接近于真实环境中的雷达信号^[1]。

新兴的 SystemVue 仿真平台, 它以图符化模块构建理论模型, 是一个适用于动态系统分析的仿真平台, 能够对系统设计进行数字仿真, 完成系统性能的合理分析和仿真评估。本文利用 SystemVue 仿真平台对雷达信号处理过程进行仿真, 研究相应仿真模块的功能及原理, 按照雷达系统组成构建各个仿真分系统, 完成雷达系统建模; 结合信号处理理论, 仿真并分析在杂波/噪声环境下雷达回波信号经过脉冲压缩、动目标检测、CFAR 等环节处理后的信号特征, 验证该仿真模型的正确性。

1 SystemVue 概述

SystemVue 仿真软件是安捷伦公司近年来开发的电子装备系统级仿真软件, 主要用于通信、雷达、导航和电子战等方面的仿真^[2]。SystemVue 仿真软件使用图符化模块构建理论模型, 模拟电子系统的实际工作状态, 并带有功能

收稿日期: 2019-06-29; 修回日期: 2019-08-02。

基金项目: 河北省自然科学基金(F2019506037)。

作者简介: 尹园威(1984-), 男, 河南滑县人, 讲师, 博士, 主要从事雷达信号处理方向的研究。

强大的仿真分析窗口,可辅助使用者对信号和系统特性进行详细分析。分析窗口不仅可以按照仿真系统运行结果实时自动显示信号波形图,还可以根据需要进行接收模块的参数,快速绘制时域和频域等各种仿真结果图^[3-4]。近年来, SystemVue 仿真软件不断升级版本,对仿真案例库、模型库、源库进行更新完善,是一个优良的电子装备系统级设计和仿真的软件平台^[5]。

2 雷达系统建模设计

雷达信号处理是对雷达接收的回波信号进行处理,抑制回波中的噪声、杂波及干扰,有效提取出目标的有效信息^[6]。从图 1 中可以看出雷达信号处理的对象是目标回波。因此,对雷达信号处理系统仿真有两个关键部分:一个是回波生成;另一个是信号处理。

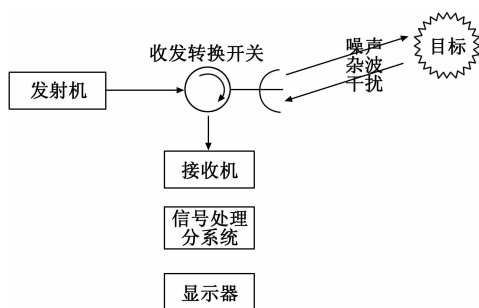


图 1 典型雷达目标探测原理图

2.1 雷达回波生成建模

2.1.1 雷达回波生成基本原理

雷达向自由空间中发射电磁波,当发射的电磁波碰到目标后,目标就对电磁波进行散射,反向传回目标回波信号,其中包含目标的速度、大小等相关信息。在雷达实际工作中,回波信号在传播过程中会受到噪声、杂波以及各种干扰的影响,使回波信号中不仅含有时间延迟、多普勒频移等有用信息,还含有 RCS 闪烁、杂波、噪声以及干扰等各种无用的信息^[7-11]。

雷达接收的信号可以表述为:

$$x(t) = S(t) + N(t) + C(t) + J(t) \quad (1)$$

其中: $S(t)$ 为目标回波信号; $N(t)$ 为噪声,包括接收机内部噪声及天线和外部环境噪声; $C(t)$ 和 $J(t)$ 分别为杂波和干扰。

目标回波信号可以表述为:

$$S(t) = Ak\sigma_s(t - \tau)\exp[j2\pi(f_c + f_d)t]\exp[-j4\pi f R_0/c] \quad (2)$$

式中, A 为传播衰减; k 为空间传播常数; σ 为 RCS 起伏; τ 为延迟时间; f_c 为载频; f_d 为多普勒频率; R_0 为目标距离。

脉冲雷达通过对 τ 与 f_d 进行相关公式求解,可以求出目标的距离与速度。而 $N(t)$ 、 $C(t)$ 与 $J(t)$ 都需要雷达在信号处理过程中加以抑制。

2.1.2 回波生成 SystemVue 仿真模型

1) 目标模型:

SystemVue 雷达模型库中有多种目标回波模块,本章仿

真使用的是 RADAR_TargetEcho 动目标仿真模块,利用该模块可以实现移动目标回波仿真,该模块考虑了地球传播效应,其主要参数有:坐标模式、目标与雷达的位置关系、目标的状态(速度、加速度、抖动)、采样率、多径效应、介电常数、偏振类型、目标散射、目标类型、假目标、干扰机类型等。其中目标 RCS 抖动值参数不仅可以设置 Swerling0、SwerlingI、SwerlingII、SwerlingIII、SwerlingIV 五种典型 RCS 值还可根据需要设置自定义的 RCS 值^[12]。

2) 杂波/噪声模型:

SystemVue 模型库中的杂波/噪声模块,主要有概率分布函数(PDF)与功率谱密度(PSD)两项参数,通过这两项参数可以对杂波/噪声模块的杂波、噪声类型进行配置^[13]。本章仿真使用的是 RADAR_Clutter 杂波仿真模块,概率分布函数选取的是对数正态分布(LogNormal PDF),杂波功率谱密度选取的是高斯(Gaussian PSD),利用该模块可以实现地面杂波建模。该模块中应用了传输延迟和多普勒频移,其主要参数有:射频载波频率、杂波相对径向速度、杂波振幅概率密度、杂波功率谱密度等。本章仿真是 AddNDensity 噪声仿真模块,噪声类型选取的是高斯白噪声,该模型可以给输入信号增加噪声。其主要参数有:噪声密度类型、噪声功率谱密度、参考电阻等。

2.2 雷达信号处理建模

2.2.1 雷达信号处理基本原理

雷达信号处理是指对观测信号进行分析、变换、综合等处理,具有抑制非期望信号,增强有用信号,估计信号的特征参数或信号模数间转换的功能^[14-15]。雷达信号处理常用的方法有脉冲压缩、积累、动目标、旁瓣相消、数字波束形成、恒虚警检测等。

抑制噪声可以使用脉冲压缩、积累来提高信噪比。在时域上对信号进行脉冲压缩,实际上是对信号进行自相关,将信号的大部分能量集中到主瓣上,而噪声的能量密度始终不变,从而提高信号的信噪比^[16]。

对运动目标与干扰杂波进行区分可以使用动目标处理。动目标处理是利用两者相对雷达在速度上的差异引起的回波信号在频域上的特性差异(多普勒差异),将两者区分出来,并通过滤波器滤除杂波获得运动目标回波,从而提高信号的信杂比。根据使用技术的不同,动目标分为动目标显示(MTI)和动目标检测(MTD)两种类型。动目标显示是利用杂波抑制滤波器来抑制各种杂波,提高雷达对运动目标的显示能力;动目标检测则是利用多普勒滤波器组对回波的多普勒频率按多普勒滤波器组的各组窄多普勒通道频率范围进行分组检测,提高雷达在杂波环境下对运动目标的检测能力。

为了在复杂电磁环境下确定目标存在,同时保证恒定的虚警概率,通常雷达系统采用恒虚警(CFAR)处理。CFAR 是遵循奈曼-皮尔逊准则的一种雷达信号处理方法。CFAR 处理的基本过程是估计需要检测的单元中的噪声和干扰电平,并根据估计值设置阈值,然后与检测单元信号

进行比较以确定是否存在目标^[17-18]。

2.2.2 雷达信号处理 System Vue 仿真模型

1) 脉冲压缩模型:

在 SystemVue 仿真软件中, 脉冲压缩模块利用 FFT (快速傅立叶变换) 对信号进行脉冲压缩。其参数主要有: FFT 的大小、信号的带宽、基带采样率、窗口函数类型等, 其中利用窗型参数选择不同的幅度加权窗函数, 可以抑制脉冲压缩结果的旁瓣。

2) MTD 模型:

在 SystemVue 仿真软件中, MTD 的实现基于不同 PRI 的相同距离门数据上的 FFT, 使用者可以用提供的频域加权来自定义多普勒域整形, 还可以指定不同的时域窗口函数来支持数据的时间窗口。该模型参数主要有: 脉冲重复间隔、CPI (相干处理间隔) 中的脉冲数、频率域的权重、时域窗口函数、时域窗口的数组参数等。

3) CFAR 模型:

在 SystemVue 仿真软件中, 有二维恒虚警和一维恒虚警两种 CFAR 模型, 二维恒虚警用于距离-多普勒阵列雷达。一维恒虚警与二维恒虚警检测原理相同, 只是数据的选取与参数设置不一样。一维恒虚警采集的数据窗是一维的, 要么是距离信息, 要么速度信息; 二维恒虚警采集的数据窗是二维的, 一个维度为距离信息, 另一个维度为速度信息。CFAR 模型的参数主要有: CFAR 的类型、CFAR 单元类型 (距离和或多普勒)、检测单元样本的大小、参考单元的样本数量、保护单元的样本的数量、检波器类型 (幅度、平方律、对数、对数平方)。

其中 CFAR 类型有 CA-CFAR、GO-CFAR、SO-CFAR、Clutter Map CFAR (杂波图 CFAR)。单元平均 CFAR (CA-CFAR) 在均匀杂波环境下表现出最佳性能; GO-CFAR 是 CA-CFAR “最大值”, 用于减少杂波边缘的假警报; SO-CFAR 是 CA-CFAR 的 “最小值”, 用于估计滞后和超前参考窗口的干扰功率, 并选择两者中较小的一个作为 CFAR 统计量; 杂波图 CFAR 通过对同一单元归一化门限调整, 从而建立起起伏杂波图, 并根据杂波图对信号做平滑, 以得到恒定虚警概率^[19]。

3 SystemVue 仿真实现

3.1 仿真场景设置

在仿真中, 设置一个脉冲雷达向距离 3 000 米以 300 米/秒的速度逐渐远离的常规无翼导弹点对点发射线性调频脉冲信号 (以下简称发射信号), 发射信号经目标散射产生回波信号反向传回雷达。回波信号经过一段存在杂波/噪声的空间传播后到达脉冲雷达处, 被脉冲雷达的接收机接收, 处理后送到信号处理分系统进行信号处理提取目标信息。

根据以上对回波生成和雷达信号处理建模原理的研究和仿真场景设置, 构建杂波环境下雷达信号处理工作过程的原理框图, 如图 2 所示。

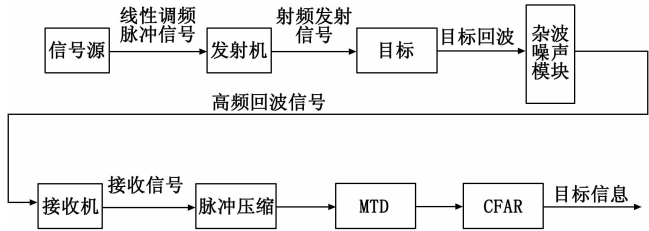


图 2 杂波环境下雷达信号处理工作过程的原理框图

3.2 雷达系统建模总体设计框图

依据图 2 的原理框图以及前文对各模型的原理分析, 使用 SystemVue 仿真平台搭建雷达信号处理系统仿真模型。搭建完毕后对各模块进行参数配置并进行仿真测试。杂波环境下雷达信号处理仿真总体框图如图 3 所示。雷达系统包含有信号源、发射分系统、回波生成分系统、接收分系统、信号处理分系统, 从图中可以看出各个分系统的相应位置以及信号流向关系。

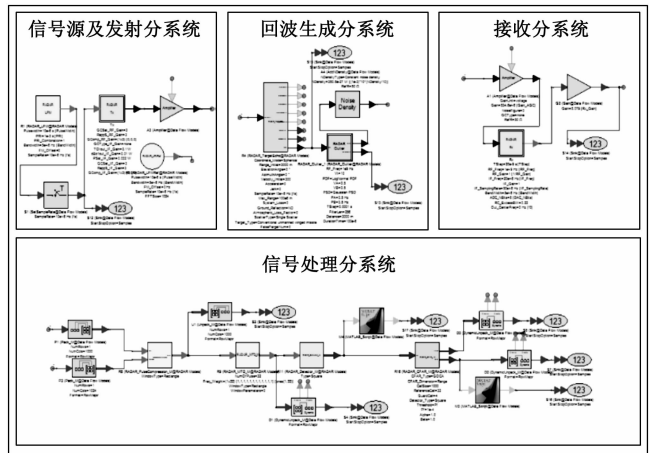


图 3 杂波环境下雷达信号处理仿真框图

为了能够清晰地分析整个仿真框图, 将其按雷达系统组成划分为几个分系统对其功能及信号流程进行阐述。

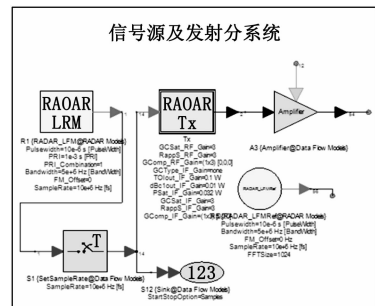


图 4 信号源及发射分系统仿真框图

3.3 信号源及发射分系统仿真

在图 4 中, Radar_LEM 信号源模块产生的线性调频发射信号经 Set_Sample_Rate 采样模块脉冲采样后, 送入 RADAR_Tx 发射机模块和 Amplifier 放大器模块进行载波调制、功率放大等处理形成雷达射频发射信号, 然后将其

送入目标环境分系统。RADAR_LFMRef 信号函数模块为脉冲压缩模块提供线性调频参考信号。如图 5 所示,是该分系统产生的雷达射频发射信号时域仿真图。

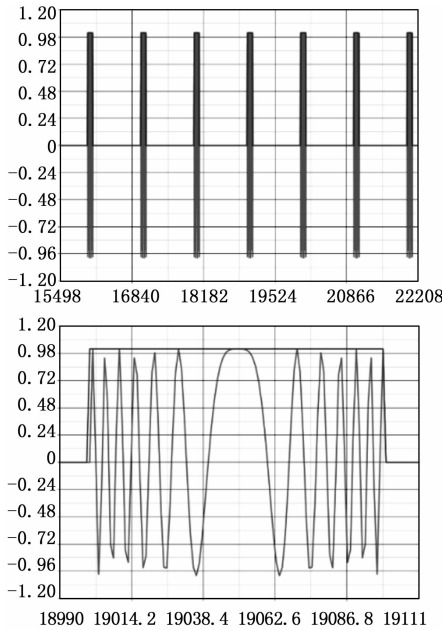


图 5 雷达发射信号时域仿真图

3.4 回波生成分系统仿真

图 6 中, RADAR_TargetEcho 目标模块可以设定目标状态信息,包括目标的类型设为常规无翼导弹、目标的速度 300 米/秒、加速度 0、初始距离 3 000 米、散射截面积等,根据这些信息来产生目标回波;RADAR_Clutter 杂波模块产生地面杂波形成单点杂波回波信号,Noise Density 噪声模块产生高斯白噪声。通过该分系统,产生目标(具有 RCS 起伏)回波信号并在传播过程中将受到杂波、噪声等影响,从而生成一个接近于真实环境的雷达回波信号。从图 7(目标回波信号时域仿真结果)可以看出目标回波信号在时域上相对发射信号延迟。图 8 雷达回波信号时域仿真结果显示出目标回波信号被杂波、噪声混叠,并使目标信号完全淹没在杂波、噪声之中。

3.5 雷达信号处理分系统仿真

在实际雷达信号处理中,其数据处理方法有矩阵、非矩阵两种。此次仿真基于矩阵数据进行雷达信号处理。在运行仿真过程中矩阵数据可以通过更新矩阵行和列的维数,实现动态地更新输入样本和输出样本,因此,当工作模式发生变化时,不需要停止仿真。而对于非矩阵数据,由于在仿真过程中不能更新模型参数,因此很难实现动态仿真^[20]。

在图 9 中, Pack_M 矩阵函数模块, Unpack_M 解压缩矩阵函数模块, DynamicUnpack M 模块等的功能是将信号的数据类型按要求转换为矩阵数据类型或非矩阵数据类型。下面按照信号流顺序,对信号处理过程进行阐述。

接收信号,首先将经过接收机 RADAR_Rx 模块输出

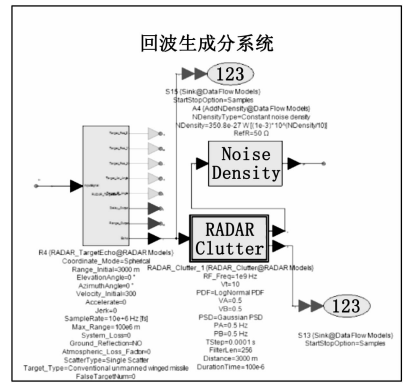


图 6 回波生成分系统仿真图

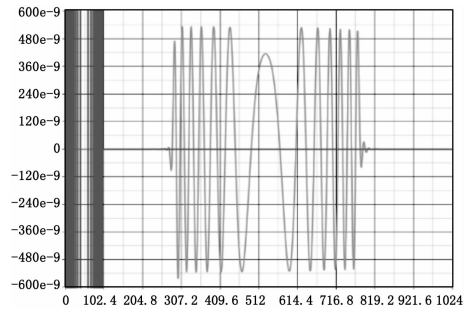


图 7 目标回波信号时域仿真结果

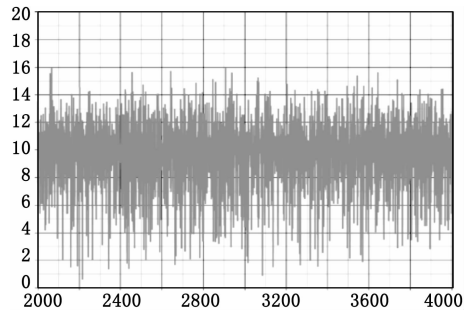


图 8 雷达回波信号时域仿真结果

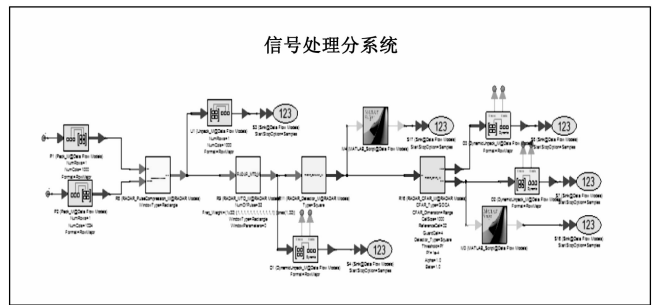


图 9 雷达信号处理系统仿真图

为多路视频信号,经 Pack_M 矩阵函数模块转换为矩阵数据后,送入 RADAR PulseCompression_M 脉冲压缩模块进行脉冲压缩处理。从图 10 脉冲压缩处理的时域仿真结果可以看出回波信号从宽脉冲压缩到窄脉冲,使信号的能量集中到主瓣上而噪声的能量密度不变。通过脉冲压缩处理

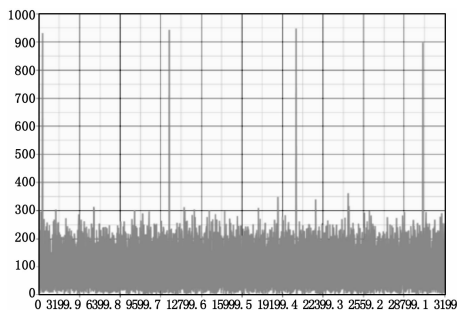


图 10 脉冲压缩处理的时域仿真结果

解决了远距离探测和高距离分辨力之间的矛盾, 并对噪声起到抑制效果。

RADAR_MTD_M 动目标检测模块, 在雷达信号处理中是关键环节, 它可以提高雷达在杂波背景下检测运动目标能力。在 MTD 处理前, 被处理数据会以一个相干积累间隔为单位存储于矩阵中, 含有回波信号距离与速度两维信息。矩阵中每一行数据距离相同、速度不同, 每一列数据速度相同、距离不同。MTD 通常采用滤波器组或 FFT 组进行距离-多普勒的两维信号处理, 这里使用易于计算机实现的 FFT 组来获得目标的多普勒频移 f_d 和回波的延迟 $\tau^{[21]}$, 通过相关公式^[22] 求解便可得到目标的速度和距离信息。从图 11 可以看出, 回波信号经过 MTD 处理后, 增强了信号幅度并降低了杂波强度, 使信号的信杂比得到提高。

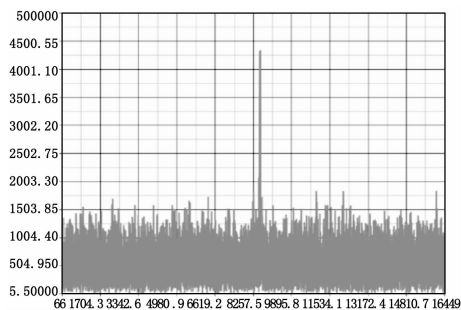


图 11 MTD 处理的时域仿真结果

经过上述处理后, 回波信号中的噪声、杂波虽然得到了极大的削弱, 但对雷达的自动门限检测仍有影响。为了保持信号检测时的虚警概率恒定, 进行恒虚警处理是十分有必要的。RADAR_CFAR_M 是恒虚警模块, 在该仿真中采用 CA-CFAR 类型, 在距离和多普勒间隔上进行单元平均。其具体过程是利用检测单元两侧相邻的独立同分布的参考单元采样值估计杂波功率, 求得参考单元的均值作为检测门限, 然后检测单元内的信号与门限进行比较从而判断是否存在目标^[6-7, 22]。从图 12 可以看出, 回波信号中低于检测门限的杂波全部被滤除, 仅保留高于门限的目标信号, 极大降低了雷达的虚警率。

4 结束语

本章主要对杂波环境下雷达信号处理的 SystemVue 仿

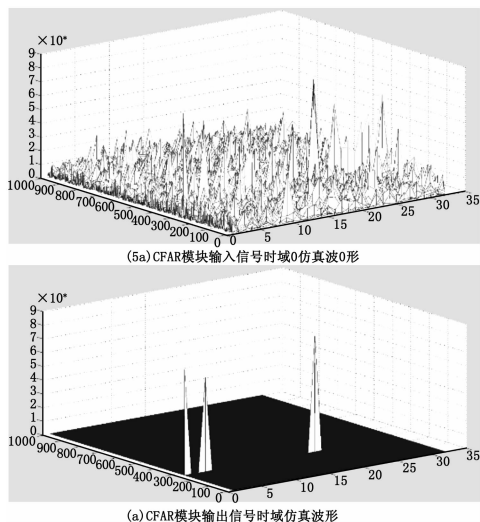


图 12 CFAR 处理结果的时域仿真 3D 图

真建模方法进行研究, 阐述了回波生成及雷达信号处理的基本原理, 并对 SystemVue 仿真平台的专用雷达模型库中用于仿真的目标模型、杂波/噪声模型、脉压模型、MTD 模型、CFAR 模型的功能及参数进行研究, 完成了雷达系统的建模设计及仿真实现。在仿真实例中, 以脉冲雷达向常规无翼导弹发射线性调频脉冲信号为例, 建立目标散射后受到杂波/噪声模块干扰的仿真模型, 经过脉冲压缩、MTD、CFAR 等雷达信号处理过程, 能够有效提取出目标信息, 对杂波/噪声达到了良好的抑制效果, 验证了仿真模型的正确性。

参考文献:

- [1] 吕品品, 付强. LabVIEW 与 Matlab 在雷达信号仿真中的应用 [J]. 火控雷达技术, 2014, 39 (2): 45-47.
- [2] 赵杨, 尚朝轩, 韩壮志. SystemVue 在雷达系统仿真中的应用 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (1): 73-77.
- [3] 林哲之, 成新民. 基于 System View 的模拟滤波器设计 [J]. 数字技术与应用, 2012 (04): 154.
- [4] 胡琳娜. SystemView 软件在“通信原理”辅助教学中的应用 [J]. 中国电力教育, 2013 (28): 100-101.
- [5] 肖忠模, 陈绍谏. 数字信号处理系统设计的新途径 [J]. 现代电子技术, 200 (01): 18-19.
- [6] 陈伯孝, 朱伟, 孙光才, 等. 现代雷达系统分析与设计 (1 版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.
- [7] 张文辉, 张永宁, 田雨书, 陈丁. 基于 SystemVue 的复杂电磁环境中雷达半实物仿真 [J]. 火控雷达技术, 2018, 47 (2): 85-90.
- [8] 郑昌艳, 何强, 张杰. 基于 SystemVue 的炮位侦察雷达炮弹回波信号生成 [J]. 微型机与应用, 2016, 35 (3): 81-83.
- [9] 张杰, 何强, 韩壮志. 基于 SystemVue 的某型雷达发射信号生成 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (21): 45-48.
- [10] 刘利民, 程呈, 韩壮志. 基于 SystemVue 的雷达信号环境建模与实现 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29 (6): 1317-1326.

[11] 王旭明, 面向雷达性能评估的电磁环境模拟研究 [D]. 石家庄: 军械工程学院, 2011.

[12] 秦轶炜. 多功能低空三坐标雷达信号处理系统的设计与实现 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015, 32-40.

[13] SystemVue 在有源阵列天线研究中的应用 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (24): 45-48.

[14] 乔凯. 基于数据流的雷达抗干扰及杂波抑制技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

[15] 王珏. 轻型侦察车雷达信号处理技术研究及终端软件开发 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.

[16] 王平安. 基于 FPGA 的舰载三坐标雷达 DBF 及信号处理技术研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.

[17] 王雨阳. 基于 FPGA 和 ADSP 的数字波束形成技术的工程实现 [J]. 现代电子技术, 2008 (07): 33-35.

[18] 徐群凤. 三坐标雷达系统的建模与仿真应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.

[19] 刘利民, 程呈, 韩壮志. 实时机载雷达告警仿真系统设计与实现 [J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38 (4), 812-820.

[20] 王明扬. 超宽带雷达多信号分析与处理实现方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[21] 王建强, 高青松, 谢敏. 地基雷达杂波抑制综合分析 [J]. 信息系统工程, 2017 (4): 117-120

[22] 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春. 雷达原理 (5 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

(上接第 119 页)

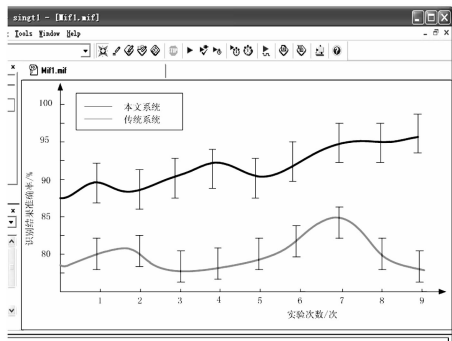


图 8 工厂噪声下实验结果对比图

由于工厂环境复杂, 所以在识别噪声过程中, 波动性比较大, 平稳性不高, 综合来看, 本文系统的识别准确率依旧高于传统识别控制系统。

在 F16 机噪声情况下进行测试, 得到的实验结果如图 9 所示。

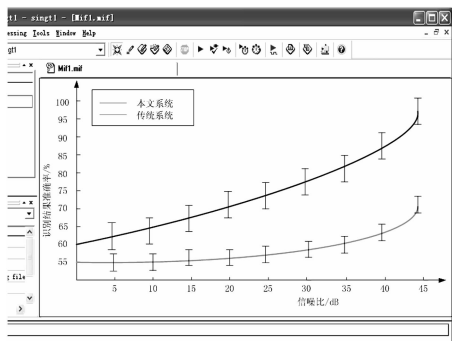


图 9 F16 机噪声下实验结果对比图

观察图 9, 在 F16 机噪声下, 传统识别机器人控制系统的工作状态十分不稳定, 工作中的波动性极高, 而本文系统获取信息的识别率更高, 性能也更好。

综合上述结果可知, 在存在噪声和不存在噪声两种情况下, 本文研究的系统控制能力都要优于传统系统, 噪声鲁棒性更好, 性能更加平稳。

4 结束语

本文设计的声纹识别机器人控制系统同时使用了操作广泛的 Windows 系统和稳定可靠的 Linux 系统作为平台, 在语

音识别技术和网络通信技术的支持下, 实现控制, 提高控制的精准性。相较于传统控制系统, 本文的控制系统更加容易实现, 且识别率更高, 性价比高, 通用型好, 开放性强, 可扩展能力高, 从整体来看, 设计的控制系统具有很强的市场竞争力, 在未来可以大力发展, 扩大应用范围。

参考文献:

[1] 李靛, 孙存威, 谢凯, 等. 基于深度学习的小样本声纹识别方法 [J]. 计算机工程, 2019, 45 (3): 262-267.

[2] 余玲飞, 刘强. 基于深度循环网络的声纹识别方法研究及应用 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36 (1): 153-158.

[3] 胡志隆, 文畅, 谢凯, 等. 联合 HMM-UBM 与 RVM 的声纹密码识别算法 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (11): 135-140.

[4] 陈文庆. 基于 Web 网络的身份识别系统的设计与实现 [J]. 微电子学与计算机, 2017, 34 (5): 114-118.

[5] 孙存威, 文畅, 谢凯, 等. 深度迁移模型下的小样本声纹识别方法 [J]. 计算机工程与设计, 2018, 39 (12): 224-230.

[6] 王丰华, 王邵菁, 陈颂, 等. 基于改进 MFCC 和 VQ 的变压器声纹识别模型 [J]. 中国电机工程学报, (5): 289-297.

[7] 周雁, 西绕多吉. 面向藏语声纹识别的语料库建设 [J]. 计算机工程与科学, 2018, 40 (11): 178-182.

[8] 章坚武, 杨佳佳, 吴震东. 一种基于指纹和声纹决策级融合识别方法 [J]. 电信科学, 2018 (3): 32-40.

[9] 吴震东, 潘树诚, 章坚武. 基于 CNN 的连续语音说话人声纹识别 [J]. 电信科学, 2017, 33 (3): 59-66.

[10] 陈秋菊, 李应. 基于优化正交匹配追踪和深度置信网的声音识别 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (2): 505-511.

[11] 赵书涛, 李沐峰, 王亚潇, 等. 断路器操动状态声音辨识的优化算法的研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (10): 26-31.

[12] 何宁, 谭智诚, 吕杏利, 等. 基于语音识别控制的激光超声水下遥感研究 [J]. 激光技术, 2017, 41 (3): 391-395.

[13] 靖固, 张学松. FPGA 语音识别的四旋翼飞行器控制系统设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22 (6): 95-101.

[14] 吴鹏, 秦水介, 徐宁. 基于激光回馈效应的声音检测与重构研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48 (11): 19-22.

[15] 惠文珊, 李会军, 陈萌, 等. 基于 CNN-LSTM 的机器人触觉识别与自适应抓取控制 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (1): 214-221.