

文章编号: 2095-4980(2019)05-0777-05

基于 System Generator 的雷达干扰信号模拟

许 雄, 吴若无, 邵 宁, 韩 慧, 曾勇虎, 汪连栋

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 针对雷达干扰信号模拟中算法设计快速验证的应用需求, 为降低系统可重构开发中的复杂程度, 研究了一种基于 System Generator 模型的 FPGA 设计开发方法, 并以噪声调频和噪声卷积算法实现。对应用实例进行了设计演示验证, 为雷达干扰信号算法验证实验提供技术参考。

关键词: 复杂电磁环境; 雷达干扰信号; System Generator 模型

中图分类号: TN974

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201905.0777

Radar jamming signal simulation based on System Generator

XU Xiong, WU Ruowu, TAI Ning, HAN Hui, ZENG Yonghu, WANG Liandong

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: According to the application requirements for fast validating the algorithm design in radar jamming signal simulation, a kind of FPGA design method based on System Generator model is developed in order to reduce the complexity of reconfigurable system development. Then the noise modulation and noise convolution algorithm are designed for demonstration as an example. The investigation results can provide technical reference for the verification experiment of radar jamming signal algorithm.

Keywords: complex electromagnetic environment; radar jamming signal; System Generator model

FPGA 已成为数字信号处理系统的核心器件^[1-3], 广泛用于各类需要进行软件功能重构的电子设备中。该芯片内包含了丰富的逻辑资源, 还有多路复用器、存储器、硬核乘加单元以及内嵌的处理器等模块, 具备高度并行计算的能力。它通过编程组合内部的基本逻辑单元来实现不同功能, 特别适合于完成数字滤波、快速傅里叶变换等。其灵活的现场可配置特性使得由 FPGA 构成的数字信号处理系统非常易于修改、测试及硬件升级, 在目前各类雷达、通信、电子对抗等设备中均处于核心位置。但是, 对 FPGA 的开发是一件比较复杂的事情, 同时, 现在 FPGA 硬件的设计更多地采用了模块化的设计思想, 通常都支持搭载不同 FPGA 芯片的多款板卡灵活插拔使用, 而且各种新工艺新架构的 FPGA 芯片也在快速的更新出产中, 导致开发人员在熟悉芯片结构上耗费大量的时间和精力。为了设计开发的方便, 基于模型的设计方法于 2001 年左右被提出。该理念有 2 个基本特征: 一是采用高级语言如 C、C++、Matlab 对系统建模; 二是采用图形化的基于模型的设计工具如 SystemVue、Simulink 对系统建模^[4-7]。由于该方法的具体实现与所选择的硬件平台及其开发环境有密切关系, 本文以 Xilinx 的 FPGA 及其开发环境为例进行阐述。System Generator 是 Xilinx 针对数字信号处理专门开发的一个系统级建模工具, 它提供了一种基于模型的系统级设计理念, 把系统级和寄存器传输级 2 个设计领域的开发工具连接起来嵌入在 Simulink 环境下, 以 Simulink 的一个图形化的 Blockset 形式呈现。因此, 基于 System Generator 模型进行 FPGA 设计开发已在复杂系统实现中展现了强大的潜能, 必将成为未来信号处理算法开发验证的一个重要发展趋势。

本文针对雷达干扰信号模拟中算法设计快速验证的应用需求, 为了降低系统可重构开发中的复杂程度, 研究了这种基于 System Generator 模型的 FPGA 设计开发方法, 并以噪声调频和噪声卷积算法实现。对应用实例进行了设计演示验证, 期望能够为算法验证实验提供技术参考^[8]。

1 信号处理硬件平台

采用的 FPGA 硬件平台见图 1, 主要由 4 部分组成, 包括 2 块 FPGA 母版、1 个大容量存储板和 1 个主控板。

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-05-27

基金项目: 试验技术研究青年科技基金资助项目

这 4 块板都由总线背板进行全交换的连接。在 FPGA 母版上, 分别搭载了若干 AD、DA 及时钟子卡。在上述硬件架构中, 左边的 FPGA 板可用于实现基于数字射频存储器模式的假目标干扰信号输出, 右边的 FPGA 板可用于实现自主产生的噪声干扰信号输出。鉴于 FPGA 的灵活可编程特点, 该硬件平台属于典型的软件无线电平台架构, 可用于实现多种雷达信号处理、目标回波模拟、杂波模拟等, 同时由于有 2 个独立的 AD 和 DA 通道, 也可用于诸如交叉眼、交叉极化等角度欺骗干扰模拟等。

2 总体设计思路

按照图 1 的设计思路, 分别设计相应的功能框图, 见图 2 和图 3。在图 2 的噪声干扰信号模拟中, 首先将自主生成的窄带噪声分别对频点为 f_0 的点频复信号进行调幅、调频、调相处理, 得到噪声调幅、调频、调相干扰的基带信号, 噪声带宽与调制系数单独可设。此外, 还可单独生成载频为 f_0 的脉冲调制信号, 脉宽与占空比单独可设。之后再通过上位机控制, 可选择输出信号类型。这些基带信号经过选通模块后, 再通过数字上变频器(Digital Up Converter, DUC)模块和 DAC 模块实现干扰信号的模拟输出。在图 3 的假目标干扰信号模拟中, 首先由 ADC 接收点目标回波信号, 通过正交解调分系统下混频, 再在基带信号处理分系统内对接收到的下混频后的信号数字下变频到零中频, 然后进行延迟调制、多普勒频率调制、幅度调制等; 同时也可经多假目标生成系统产生指定距离间隔、目标个数的多假目标; 最后信号经过 DUC 上变频, 再由 DAC 模块实现模拟输出。该平台中的子卡可输入 2 路 ADC 信号, 因而可独立产生 2 个通道的假目标干扰信号。

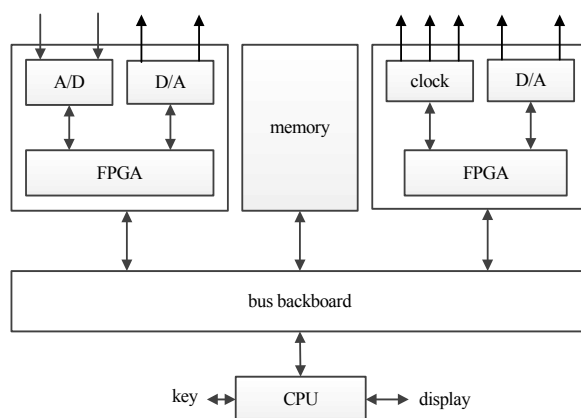


Fig.1 Diagram of signal processing hardware platform
图 1 信号处理硬件平台框图

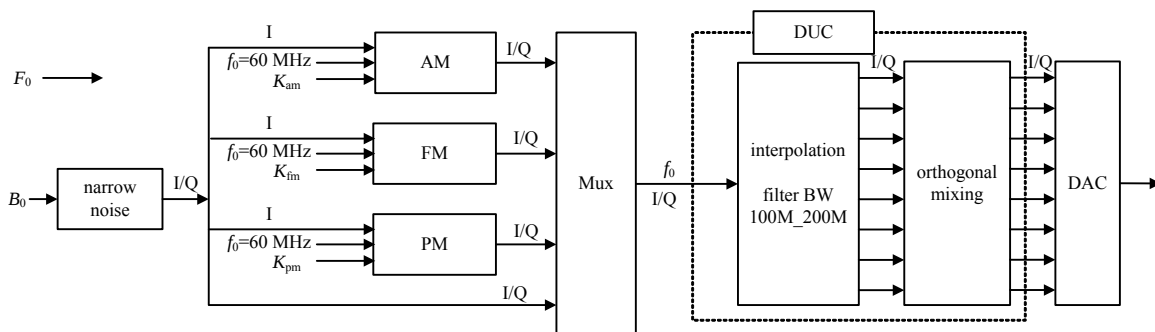


Fig.2 Diagram of noise jamming signal simulation
图 2 噪声干扰信号模拟框图

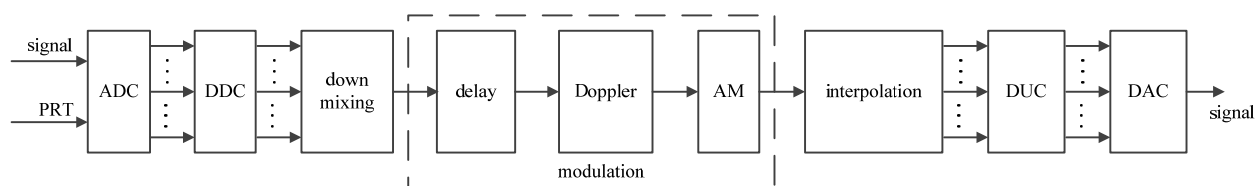


Fig.3 Diagram of false target jamming signal simulation
图 3 假目标干扰信号模拟框图

根据设计框图, 采用 System Generator 模型开发, 可以较大地简化算法实现难度。System Generator 实现了与 Simulink 的无缝链接, 在 Simulink 中可以找到 Xilinx 提供的模块库。通过使用该模块库中的模型, 可以直接转换成能够在 FPGA 上运行的代码或 bit 流文件。该模块库提供了很多常用的 IP 核以及基本的处理单元, 利用 System Generator 及 DDS IP 核等, 可以直接建立各种类型的信号处理模型。

3 关键模型设计与测试

下面分别从噪声调频和噪声卷积这 2 个关键、典型的算法给出相应的 System Generator 模型设计。噪声调频是一种最常用的压制干扰信号样式:

$$J(t) = \cos \left[2\pi f_0 t + 2\pi K_{fm} \times \int_0^t u(t') dt' \right] \quad (1)$$

式中： K_{fm} 为频率调制系数； $u(t)$ 为带限噪声； f_0 为待调制信号中心频率。

噪声卷积干扰是一种灵巧噪声干扰，对所采集存储到的雷达信号波形进行调制，其既具有压制干扰的特点又具有欺骗干扰的特点。其数学表达式为：

$$S_j(t) = U(t) * s(t) = \text{IFFT}[\text{FFT}(U(t)) \times \text{FFT}(s(t))], 0 < t < T \quad (2)$$

式中： $s(t)$ 为截获的信号； $U(t)$ 为调制噪声。时域的卷积即为频域的相乘，信号与噪声经快速傅里叶变换后在频域相乘，然后经快速傅里叶逆变换后输出，即可得到相应的干扰信号。

3.1 噪声调频的模型设计

在噪声干扰的模拟中，核心就是利用 System Generator 模型设计噪声调频的模块，本文采用 Blockset 中的 DDS Compiler 模块实现。该模块分别有 3 个输入、3 个输出，其中 1 个输入用作使能端，1 个输入用来控制载频，第 3 个输入用作调制，调制的输入端需由调频系数和原始射频噪声再通过一个乘法器实现。输出端的 1 个用于表示计算完成，另外 2 个则为调制后的 I/Q 信号输出。整个模型再考虑部分时序的因素，算法模型见图 4。

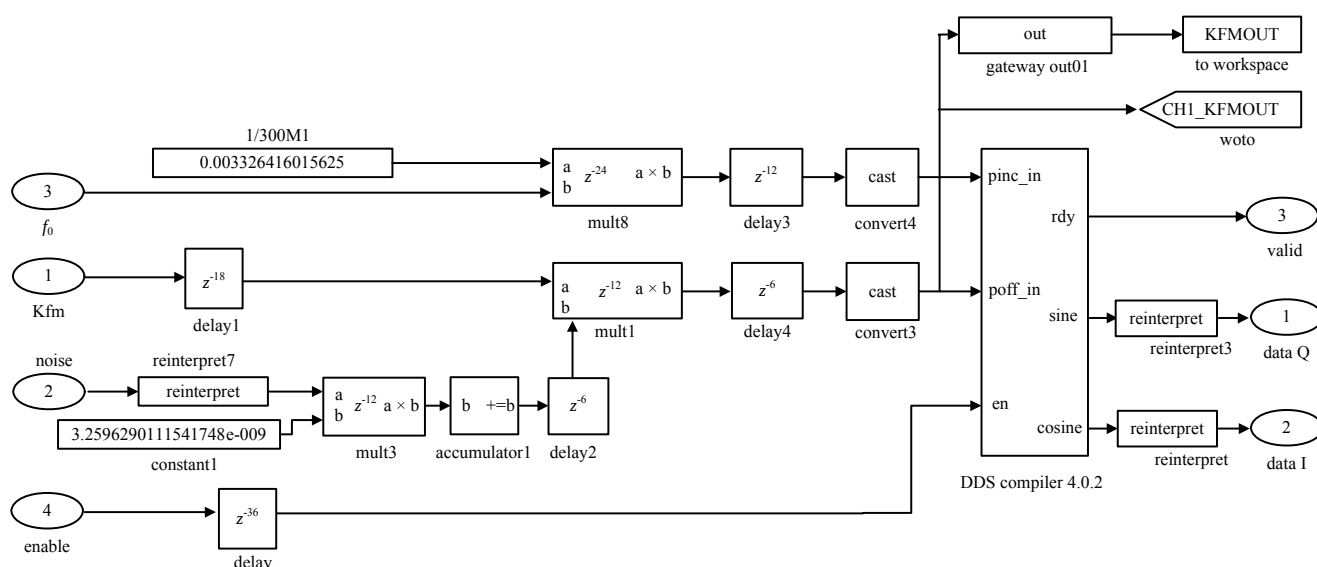


Fig.4 System Generator model of frequency modulation with noise
图 4 噪声调频算法的模型

如噪声调频式(1)所示，连续域的积分等价于离散域的求和，因此在相位控制字端以窄带噪声的累加作为控制输入，实际输入应为 $2\pi K_{fm} \times \text{sum}[u(n) \times \Delta t(n)]$ ，其中 $u(n)$ 为窄带噪声输入。将弧度转换为度，可得输入为 $K_{fm} \times \text{sum}[u(n) \times \Delta t(n)] \times 360^\circ$ ，又因为相位控制字端需要以 360° 作归一化处理，因此最终的实际输入为 $K_{fm} \times \text{sum}[u(n) \times \Delta t(n)]$ 。需要注意的是各参数位数的选择会直接影响相位的控制精确度。

3.2 噪声卷积的模型设计

在典型的灵巧噪声干扰中，用噪声卷积雷达信号是一个关键的算法模型。本文采用 2 个 FFT 和 1 个 IFFT 模块实现，同时配合 Complex Multiplier 模块完成。整个模型设计见图 5。

如噪声卷积干扰式(2)所示，截获的雷达信号用 DDS Compiler 模块模拟，高斯白噪声由 White Gaussian Noise Generator 核直接生成，两者都经过 FFT 模块进行傅里叶变换到频域后，经过 Complex Multiplier 模块完成 2 路 I/Q 信号的复数相乘，乘积再由 IFFT 模块进行逆变换回时域，输出 2 路正交的 I/Q 时域干扰信号。

从这些关键算法的实现情况可以看到，利用 System Generator 模块设计 FPGA 时，各个模块的实现与数学公式基本上都能逐一对应，具有很强的直观性，非常有助于算法工程师快速、高效地实现 FPGA 的设计与调试。

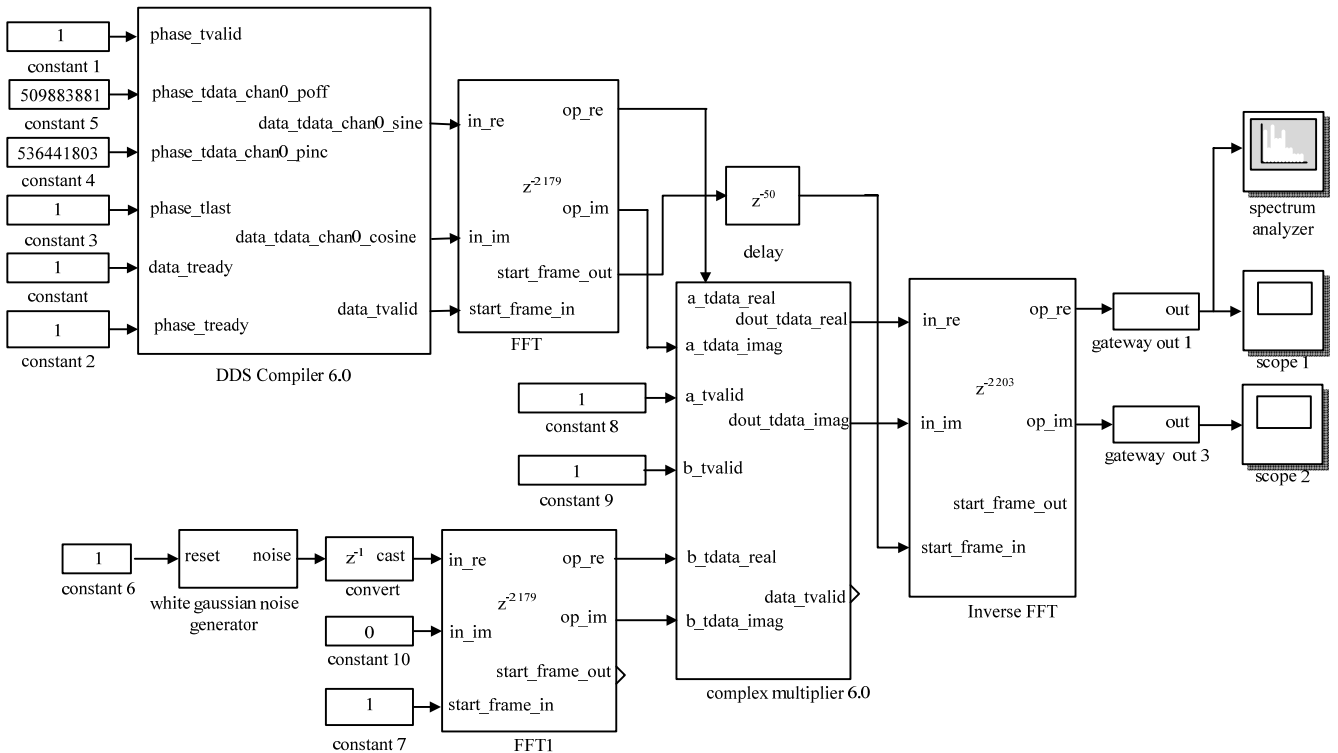


Fig.5 System Generator model of convolution modulation with noise
图 5 噪声卷积算法的模型

3.3 实验测试情况

按照图 2 和图 3 的框图设计思路,完成 ADC,DAC 及正交上下变频等公用模块的具体设计。进而将上述两类工程设计图,嵌入相应的干扰信号模拟工程文件中,进行简单的比特流文件生成、下载及上板调试。图 6 为噪声调频算法实现时干扰输出波形及频谱的测试结果。可以看到,单一载频的信号被噪声进行了频率随机调制,频谱宽度获得展宽,与预期的逻辑设计目标一致,算法设计开发及实现过程正确、有效。

图 7 为噪声卷积脉冲波形后的时域波形图,整个脉冲的载频和幅值都获得了随机调制,与预期的逻辑设计目标一致。简单修改相关图形逻辑,还可以实现其他类型如噪声调幅、噪声调相等噪声调制信号波形输出,进一步显示了基于 System Generator 模型进行 FPGA 算法软件化开发的方式具有很好的应用潜力。

为验证相关的干扰波形的有效性,本文在外场的实装雷达抗干扰试验中对这些波形进行了整体测试,实现了某种试验环境下对有人机和无人机两类目标的压制,发挥了预期的压制干扰作用,并且也实现了试验中对不同算法的直观、高效的切换验证,从而证明了基于 System Generator 的雷达干扰信号模拟方法具有较好的工程应用性。



Fig.6 Test result of frequency modulation with noise
图 6 噪声调频测试结果

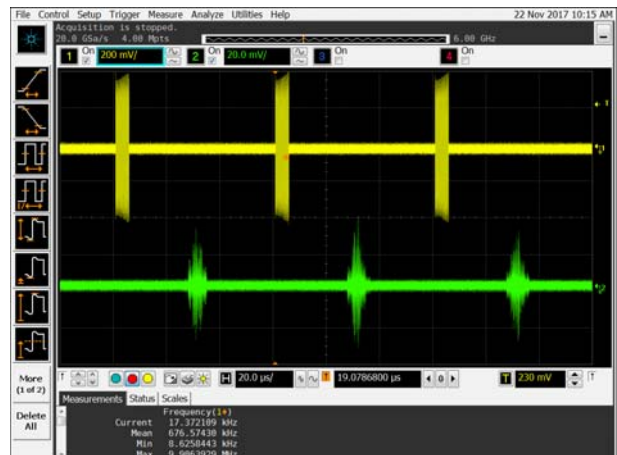


Fig.7 Test result of convolution modulation with noise
图 7 噪声卷积测试结果

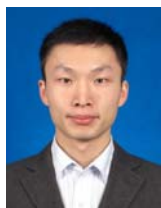
4 结论

本文针对雷达干扰信号模拟的 FPGA 快速实现需求, 基于 System Generator 工具, 阐述了如何在开放式的信号处理硬件平台上, 快速设计搭建相关干扰信号关键算法的 System Generator 模型的方法, 为降低系统可重构开发中的复杂程度提供一定的技术参考, 期望能够在各类电磁环境模拟中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 纪志成,高春能. FPGA 数字信号处理设计教程——System Generator 入门与提高[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2008. (JI Zhicheng,GAO Chunneng. FPGA digital signal processing design course—Introduction and improvement of System Generator[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2008.)
- [2] 宁丽娟. 基于 FPGA 的可编程电磁环境信号仿真器的设计[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2015. (NING Lijuan. Design of programmable electromagnetic environment signal simulator based on FPGA[D]. Qinhuangdao,China:Yanshan University, 2015.)
- [3] 王硕. 基于 FPGA 的雷达目标模拟器设计与实现[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2015. (WANG Shuo. Design and implementation of radar target simulator based on FPGA[D]. Qinhuangdao,China:Yanshan University, 2015.)
- [4] 杨琪,邓彬,王宏强,等. 基于 Simulink 的太赫兹雷达系统仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):174–178. (YANG Qi,DENG Bin,WANG Hongqiang,et al. Terahertz radar system simulation based on Simulink[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):174–178.)
- [5] 黄明慧. 基于 FPGA 模型化设计的雷达信号处理的实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010. (HUANG Minghui. Implementation of radar signal processing based on FPGA model design[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2010.)
- [6] 牛斌凯,雍少为,张建,等. 基于 System Generator 开发数字信号处理系统[J]. 舰船电子工程, 2010,30(1):129–132. (NIU Binkai,YONG Shaowei,ZHANG Jian,et al. Development of digital signal processing system based on System Generator[J]. Ship Electronic Engineering, 2010,30(1):129–132.)
- [7] 王少飞. 基于模型的设计在 FPGA 上的一种实现方法[D]. 成都:电子科技大学, 2012. (WANG Shaofei. An implementation method of model based design on FPGA[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2012.)
- [8] TANG Lijian,HUANG Jianchong. Research on smart noise jamming to LFM pulse compression radar[J]. Electronic Warfare, 2008,24(1):14–17.

作者简介:



许 雄(1985–), 男, 福建省莆田市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达对抗试验技术、复杂电磁环境特性与模拟、复杂电磁环境效应.email:xuxiong2008@foxmail.com.

吴若无(1987–), 男, 四川省广安市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为雷达对抗试验技术、复杂电磁环境特性、模拟与效应.

邵 宁(1989–), 男, 西安市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为信号处理及雷达干扰技术.

曾勇虎(1972–), 男, 江西省赣州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境效应.

汪连栋(1966–), 男, 天津市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境效应.

韩 慧(1980–), 女, 成都市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为复杂电磁环境特性与模拟.