

一种实时射频半实物仿真技术设计与实现

黄雅峥^{1,2}, 魏国华², 刘娟^{1,2}

(1. 工业和信息化部通信信息控制和安全技术重点实验室, 浙江嘉兴 314033;

2. 中国电子科技集团公司第三十六研究所, 浙江嘉兴 314033)

摘要:基于现有的通信建模及分析软件,设计了一种实时可控的射频多辐射源半实物仿真系统。该系统在软件定义无线电架构平台上进行了开发和验证,能产生包括常规通信信号、直序扩频/跳频扩频信号、战术数据链信号、雷达信号、特殊自定义信号等多种信号样式,并能同时输出16路射频信号,每路信号的调制样式、频偏、幅度增益实时可控。实现了从计算机仿真到实时电磁波信号产生的有效结合,从而丰富了测试手段,提高了设备的可靠性和适应能力。同时,该系统具有可移植、可扩展、可升级的特点。

关键词:多辐射源;半实物仿真;实时;软件定义无线电

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)05-0212-04

Design and Implementation of Real-Time RF Hardware-in-the-Loop Simulation Technology

HUANG Ya-zheng^{1,2}, WEI Guo-hua², LIU Juan^{1,2}

(1. Key Lab on Communication Information Control and Security Technique,

Ministry of Industry and Information, Jiaxing 314033, China;

2. No. 36 Research Institute of CETC, Jiaxing 314033, China)

Abstract: Based on current communication modeling and analyzing software, a real-time RF multi-emitter hardware-in-the-loop simulation system for complex electromagnetic environment is designed. It combines the computer simulation with the real-time electromagnetic waves generating, and the testing method has the advantage to enhance the reliability and adaptability. The system is developed and verified via a set of software defined radio (SDR) based platform. It can generate signals including normal communication signals, direct sequence spread spectrum (DSSS) / frequency hopping spread spectrum (FHSS) signals, tactical data-link signals, radar signals and special customized signals. At most 16 signals can be generated simultaneously on this platform, and every signal's modulation type, frequency offset and amplitude gain can be real-time controlled by the software. The system can also be transplanted, extended and updated easily.

Key words: multi-emitter; hardware-in-the-loop simulation; real-time; SDR

0 引言

随着电子设备的大量使用,在有限的频谱资源范围内,无线通信设备以及一些自然界的电磁辐射信号等混合在一起,构成了时域上突发多变、频域上交错重叠、信号样式种类繁多的复杂电磁环境^[1,2]。这给电子设备的研制带来了更大的挑战。一方面,在论证及设计过程中,不仅要验证对单纯目标信号的处理能力,还要评估其在各种复杂电磁环境下的适应能力和生存能力;另一方面,在设备出厂之前,测试过程中,采用无线

空间辐射或有线注入的方式,使其置身于更接近真实的电磁环境,通过反复训练,提高自身抗干扰能力。

半实物仿真系统又称为硬件在回路(hardware-in-the-loop)仿真系统^[3],是计算机仿真和物理效应仿真相结合的产物,它通常是将数学模型、实体模型(物理效应模型)和系统的实际设备联系在一起组成的一种实时仿真系统。半实物仿真系统具有提高系统研制质量、缩短研制周期、降低研制经费等优点,使其成为仿真领域的一个重要分支。

文中针对复杂电磁环境的建模与仿真设计了一种实时可控的射频多辐射源半实物仿真系统。该系统在现有的通信建模及分析软件上,添加了一套基于软件定义无线电的半实物仿真开发平台^[4-6],从而实现了从计算机仿真到复杂电磁波信号产生的有效结合,在

收稿日期:2011-10-12;修回日期:2012-01-16

基金项目:总装备部预研基金(9140C1303010903)

作者简介:黄雅峥(1982-),男,硕士,主要从事无线通信仿真技术研究。

电子设备研制的论证、设计、测试阶段都能起到重要作用。同时,由于该系统基于通用的软硬件平台架构,具有易移植、易扩展、易升级的特点。

1 多辐射源半实物仿真系统

1.1 系统结构

多辐射源半实物仿真系统结构如图1所示,其中包括 X86/PowerPC 平台、软件定义无线电开发平台、测试平台三大部分。

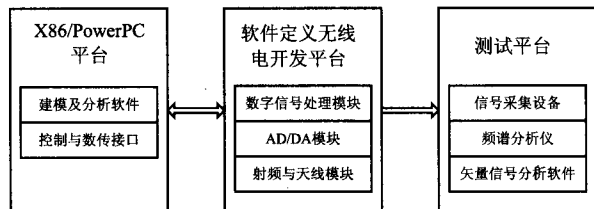


图1 多辐射源半实物仿真系统结构框图

在 X86/PowerPC 平台上,现有的通信建模及分析软件根据场景设置,完成模型构建、仿真场景构建、链路分析与评估等,从而确定辐射源个数、载波频率、调制样式、发射功率、天线方向图等信息,目标接收机将收到来自各个方向辐射源的信号,所有信号的叠加情况及其变化过程就是文中要实现的复杂电磁环境模拟。随着场景运行,辐射源属性、位置、数目的变化,以及目标的移动,都反映到目标接收到信号时频特性的变化。该系统将辐射源到达目标接收机的幅频特性参数传递到控制接口,然后通过约定好的协议格式和物理通道实时传递给硬件开发平台。数字信号处理模块将解析得到的控制指令分发给芯片内(DSP 或 FPGA)相应的 IP 核,从而控制每个辐射源的调制样式、幅度、频偏等参数。最终的合路信号经 AD/DA 模块、射频与天线模块处理后辐射出来。

多辐射源半实物仿真系统产生的射频信号通过测试仪器可以实时观察其频谱变化,如果需要更深一步的分析,可以连续采集一段射频信号,然后利用矢量信号分析软件则可以进行时域、频域、调制域的多重域分析。

1.2 现有通信建模及分析软件

现有通信建模及分析软件主要功能包括模型构建、仿真场景构建、链路分析与评估等。将天线模型的天线方向图、发射机的功率、飞机的航迹、卫星轨道和误码率等提炼为关键部件模型,并在此基础上建立天线、发射机、接收机、处理机等一些单机模型,进而利用已建立的单机模型组配设备模型。

通信建模及分析软件的分析与评估是以“链路分析”为基础的。软件中的一条链路是由一个辐射源、一个信号接收设备,以及信号在无线信道中的传播这

三个模型要素共同构成的。由于采用了“链路”作为基本分析模型,通过链路的各种组合,可以建立各种各样的复杂电磁环境仿真模型,从而能够适应各种电子设备分析需求。

1.3 多辐射源半实物仿真技术

现有通信建模及分析软件实现了在复杂电磁环境下对电子设备能量层的效能评估,多辐射源半实物仿真技术的引入则实现了从能量层到信号层的提升。复杂电磁环境将以射频的方式注入到待测设备中,因此为其出厂前和训练状态下提供了一种更接近真实电磁环境的检验手段。

目前,软件定义无线电开发平台的数字信号处理模块一般采用实时性好、运算能力强,并具有可重配置能力的,如 DSP、FPGA、PowerPC 等作为主处理芯片,辅以大容量、大带宽外围存储设备,如 DDR2/3 SDRAM、QDR II SRAM、Flash 等,采用高速传输总线技术,如 PCI、PCI-Express、RapidIO、10/100/1000Mb-Ethernet 等,实现板内、板间、设备间互连。在此基础上,文中设计了一种以 DSP+FPGA 为核心的硬件架构,如图2所示。

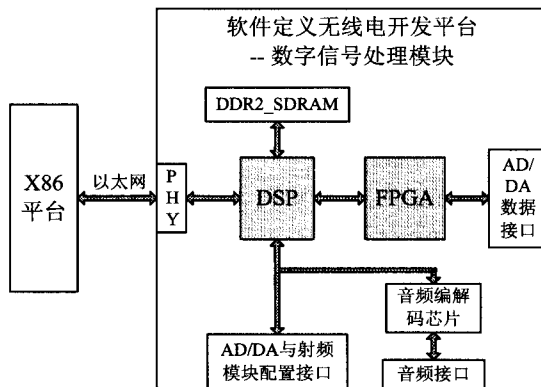


图2 数字信号处理模块结构框图

在 X86 平台一端,为实现现有通信建模及分析软件对软件定义无线电开发平台的实时控制,增加了控制与数传接口,该接口将建模及分析软件仿真过程中,按一定步进变化的辐射源个数、调制样式、幅度、频偏等参数信息,以 TCP/IP 方式传递给软件定义无线电开发平台。一方面 X86 将配置参数下载到开发平台并回读,另一方面 X86 可以将带有特殊格式的自定义波形或实际外场环境采集的背景噪声预存到开发平台的 DDR2 SDRAM 大容量内存中。

在软件定义无线电开发平台一端,数字信号处理模块上的 DSP 芯片作为控制管理芯片^[7],通过以太网 PHY 芯片完成与 X86 平台的通信,再将信息分发给各级芯片。其中 DDR2 SDRAM 内存先写入来自 X86 平台的波形数据,然后通过 DSP 芯片读出到 FPGA 中,音频编解码芯片通过 DSP 芯片与 FPGA 建立连接;AD/

DA 模块中 DA 芯片采样速率、内插倍数、输出增益控制,以及射频与天线模块中本振频率、滤波器选择、增益控制等参数也由 DSP 芯片来配置;FPGA 实时接收来自 DSP 芯片的控制指令和波形数据,实现多辐射源信号产生和合成,输出数字基带信号经 AD/DA 模块、射频与天线模块处理输出射频信号。

FPGA 完成了大部分信号产生算法实现,合路后的基带信号保持与通信建模及分析软件的仿真场景实时同步。其内部逻辑实现如图 3 所示,采用模块化设计,顶层结构主要包括数据分发模块(地址译码器)、多辐射源生成与合路模块。

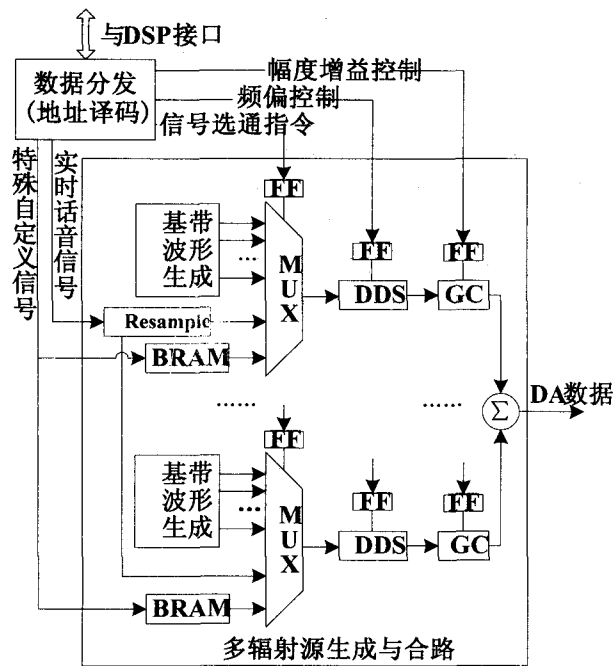


图 3 FPGA 内部逻辑实现

数据分发模块将来自 DSP 的带有地址头的配置参数或数据信息,存入相应的寄存器或内存块(18kb BRAM)中。多辐射源模块由 N 个通道组成,通道个数和调制样式类型决定了产生电磁信号的复杂程度,在 FPGA 资源充足的情况下,通道数可以达到很多,但受信号带宽限制,以及多信号混叠引起的高峰均比对非线性器件带来的挑战,实际应用中并非越多越好。每个通道有一个选通器,由 X86 指定当前通道的基带信号波形输出。大多数基带信号波形由 FPGA 内部实时生成,类型包括:常规通信信号,如 AM、FM、MPSK、MQAM、FSK、直扩信号、跳频信号等^[4];战术数据链信号^[8];特定干扰信号,如带限高斯白噪声、噪声调频、噪声调幅、多音频等;雷达脉冲信号^[9,10]。还有两路非 FPGA 内部产生的信号,分别是来自音频接口经 DSP 调制后的实时话音信号,以及来自 X86 的,预存在 DDR2 SDRAM 的特殊自定义信号或背景噪声信号。每个通道有独立的 DDS(Direct Digital Synthesizer,数字

信号合成)子模块和 GC(Gain Control,增益控制)子模块,频偏和幅度实时受 X86 控制。

2 仿真与实现

文中通过对 VC/VC++、MATLAB/SIMULINK、System Generator(SysGen)等工具的集成,实现了从系统仿真、设计实现到特定硬件实时验证无缝地衔接。其中 SIMULINK 自带的 Real-Time Workshop(RTW)组件可以将模型自动转换为目标 DSP 芯片代码^[11];Xilinx 内嵌在 MATLAB/SIMULINK 中的 SysGen^[12]工具可以完成功能级仿真,然后通过自动代码转换功能,生成可综合的 HDL 代码供上层文件例化(调用),或直接生成 bit 文件,下载到指定 FPGA 芯片上。经验证,该流程设计周期短、代码转换效率高,并且可以严格控制 FPGA 的组合逻辑级数(Levels of Logic)以满足所需的运行时钟。在 SysGen 仿真与开发环境下,某一复杂电磁环境的多辐射源频谱图如图 4 所示。

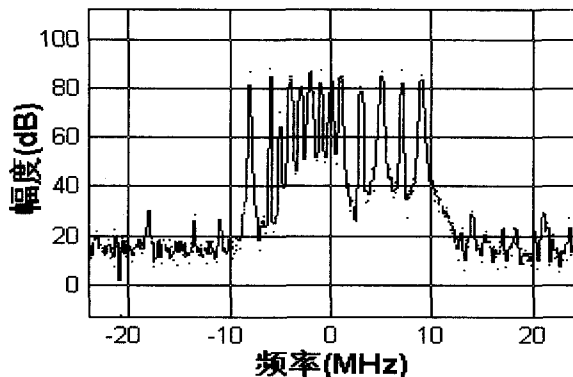


图 4 SysGen 仿真环境多辐射源频谱图

文中半实物仿真系统硬件部分采用了 Lyrtech 公司的 SFF SDR DP 小型化软件无线电开发平台,该平台包含了射频模块(收发半双工)、数据转换模块、数字信号处理模块。计算机通过 LAN 或 USB 线与平台相连,实现对射频模块本振、放大器、滤波器参数的控制,对数据转换模块采样速率的控制,生成 DSP 和 FPGA 代码并下载到数字信号处理模块,实现特定的信号处理功能。其中主处理芯片包括型号为 TMS320DM 6446 内嵌 ARM 核的 DSP 芯片^[13]和型号为 Virtex-4 XC4VSX35 的 FPGA 芯片;测试平台采用具有采集功能的 Agilent E4440A 频谱分析仪和 Agilent 89601 矢量信号分析软件。经测试,X86 对硬件平台的控制实时性小于 1ms,每个信号幅度控制精度小于 1dB,频率控制精度小于 10Hz,信号样式涵盖了前面提到的所有类型,射频输出在 20MHz 带宽内最多能够产生 16 个独立可控信号。作为主处理芯片之一的 FPGA 芯片,资源及占用情况如表 1 所示,说明仍然具有很大扩展空间。

经测试,实际产生的射频信号除底噪有所抬高外,每个独立信号的质量满足实际需要,其中一路 QPSK 射频信号用采集设备采集并解调后,其 EVM (Error Vector Magnitude) 值为 3% rms 左右,满足接收要求。

表1 FPGA 资源及占用

	FF	LUT	BRAM	DSP48
XC4VSX35	30720	30720	192	192
占用部分	7541	11329	55	84

3 结束语

文中提出了一种基于现有电子设备训练软件的复杂电磁环境多辐射源半实物仿真系统,并在一套半实物仿真平台上进行了开发和测试,实现了很好的效果。该系统完成了从能量层仿真到信号层仿真的提升,使电子设备无论在论证、设计阶段,还是在出厂前的检验阶段都能获得更接近真实的复杂电磁环境测试,提高了电子设备的可靠性和适应能力。同时该系统基于软件无线电架构设计,软硬件平台具备可移植、可扩展、可升级的特点,可适应电子设备的不断更新换代。下一步准备在自主设计的平台上进行验证,使系统功能和性能进一步提高。

参考文献:

- [1] 曾亮,戴静波,张巍.联合作战想定中的复杂电磁环境建模技术研究[J].系统仿真学报,2010,22(8):1809-

(上接第211页)

质量,满足高校师生 E-learning 的需要,利用 Web2.0 技术改造的 VLC 也将会成为未来 VLC 的一个升级替代的特征,但是 VLC 中存在的问题并不能仅仅因为技术的改进而得到有效解决^[12],这需要更多的研究者和学习者来关注。

参考文献:

- [1] 崔洪刚,许霞.基于 SOA 的虚拟学习社区协同系统[J].计算机技术与发展,2009,19(12):193-195.
- [2] 张艳喜,左宗义.基于 Web2.0 的开放式虚拟学习社区的构建探讨[J].科技创新导报,2008(9):18-20.
- [3] Blees I, Rittberger M. Web2.0 Learning Environment: Concept, Implementation, Evaluation [J]. E-Learning Papers, 2009(15):1-18.
- [4] 李克东. Web2.0 为教育带来五个变化[J].信息教研周刊,2011(7):9-10.
- [5] 张磊. Web2.0 环境下信息交流模式探析[J].科技信息,

1812.

- [2] 王汝群.战时电磁环境[M].北京:解放军出版社,2006:15-17.
- [3] 康凤举.现代仿真技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [4] 杨小牛,楼才义,徐建良.软件无线电原理及应用[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [5] 王东,胡艳军.软件无线电[J].计算机技术与发展,2006,16(12):83-85.
- [6] Leppanen P, Reinila J, Nykanen A, et al. Software Radio-An Alternative for the Future in Wireless Personal and Multimedia Communications [C]//Proceeding of the IEEE. [s.l.]:[s.n.],1999.
- [7] 魏建磊,王茹. DSP 芯片中双通道 DMA 的研究与设计[J].计算机技术与发展,2008,18(3):36-39.
- [8] 孙义明,杨丽萍.信息化战争中的战术数据链[M].北京:北京邮电大学出版社,2005.
- [9] 杨永辉,王凌.微波系统半实物仿真技术研究[J].系统仿真学报,2001,13(2):153-155.
- [10] 李俊杰,何友,宋杰.基于 FPGA 嵌入式系统的雷达信号模拟器[J].电子技术应用,2009(10):45-47.
- [11] 周晓兰,张杰. MATLAB 在通信系统仿真中的应用[J].计算机技术与发展,2006,16(9):166-168.
- [12] Xilinx. System Generator for DSP User Guide [M]. [s.l.]: Xilinx,2010.
- [13] DaVinci Technology Digital Video Innovation Product Bulletin [M]. Texas: Texas Instruments Incorporated,2007.

2010(34):235-236.

- [6] 刘宏波,刘琴涛,杨小花,等.学习资源的标准化模型研究[J].计算机技术与发展,2008,18(10):237-239.
- [7] 柯晓华.应用于知识管理事务的六度分隔理论验证系统的构建和研究[J].科技管理研究,2009(7):519-520.
- [8] 马凤娟. Web2.0 环境下虚拟学习社区模型的构建[D].济南:山东师范大学,2009.
- [9] Hargie O D W, Maidment P. Discrimination Training and Micro Teaching: Implications for Teaching Practice [J]. British Journal of Educational Technology,2006,9(2):87-93.
- [10] 周碧蕾.马斯洛理论在新生教育中的应用[J].中国电子教育,2009(3):33-40.
- [11] 熊超.基于 Web2.0 的教学资源库的研究与实现[D].北京:北京交通大学,2009.
- [12] Matos A, Kollias V. What Kind of Difficulties May Teachers Encounter in the Process of Constituting a Virtual Learning Community [C]//International Society of the Learning Science. [s.l.]:[s.n.],2008:91-92.