

一种基于 COTS 的 SAR 分布式目标模拟方法

徐稼轩, 朱占宇, 王海鹏, 王 峰

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 针对目前合成孔径雷达(SAR)目标模拟器通常只能模拟点目标,且通用化程度和实时性较低的问题,提出了一种基于商用现成品或技术(COTS)的 SAR 分布式目标模拟方法。利用 NI PXI 平台构建了一个基于电磁仿真的 SAR 分布式目标模拟器,由电磁仿真软件模拟获取目标散射特性,并通过高速网口输入硬件设备进行采样及卷积操作得到仿真 SAR 回波数字信号,经数模转换模块完成对 SAR 数字信号的调制并输出模拟回波,可以直接用于 SAR 系统的数据验证。模拟器采用数字式一体化硬件设备,由 NI PXIe-5646R 和 PXIe-5840 进行信号的接收和发送, PXIe-7902 作为系统核心进行高速实时数据运算。系统以现场可编程门阵列(FPGA)为核心,通过 LabVIEW RT (Real Time)和 FPGA 模块直接进行访问,能实时、高速地采集和处理数据。经过测试,该目标模拟器可以生成分布式目标的射频回波信号,环路验证结果证明了本文提出方法的有效性。另外,本文提出的方法适用于多种雷达信号的模拟,通过设置不同的信号体制或接收外部信号输入,可以实现灵活的 SAR 目标模拟。

关键词: 合成孔径雷达; 商用现成品或技术(COTS); 分布式目标模拟; 现场可编程门阵列(FPGA); NI PXI

中图分类号: TN 955.2; TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.06.002

A COTS-Based SAR Distributed Target Simulation Method

XU Jiakuan, ZHU Zhanyu, WANG Haipeng, WANG Feng

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Aiming at the problem that the current synthetic aperture radar (SAR) target simulator can only simulate point target objects with low generalization and real-time performance, a novel SAR distributed target simulation method based on commercial off-the-shelf (COTS) is proposed in this paper. NI PXI platform is adopted to design and build the SAR target simulator based on electromagnetic simulation. The target scattering characteristics can be simulated by computational electromagnetic simulation software. The high-speed network port is applied to link the hardware equipment, and perform sampling and convolution operations to obtain a simulated digital SAR echo, which can be directly used for data verification of the SAR system. The simulator contains several digital integrated equipment, such as NI PXIe-5646R and PXIe-5840 for signal reception and transmission, and PXIe-7902 as the core of the system for high-speed real-time data operations. The FPGA-centered system can be directly accessed through LabVIEW RT (Real Time) and FPGA modules to achieve real-time high-speed data acquisition and processing. Experimental results demonstrate the effectiveness of proposed method. In addition, it is suitable for the simulation of a variety of radar signals. Flexible SAR target simulation can be realized by setting different signal systems or receiving external signal input.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); commercial off-the-shelf (COTS); distributed target simulator; field programmable gate array (FPGA); NI PXI

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具

有全天候、全天时成像能力,已被广泛应用于资源调查、地理测绘、目标检测识别等领域。为了开展

收稿日期:2020-03-23; 修回日期:2020-04-15

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0502703);上海航天科技创新基金(SAST 2019-073)

作者简介:徐稼轩(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为 SAR 模拟、系统仿真。

雷达相关设备的研制工作,并对系统设备的性能进行全方位的考察,不仅要對器件的生产研制过程进行严格的把关,还要在实际应用场景中进行测试和验证。而通过外场模拟试验的方式,往往需要耗费大量人力物力,且信号参数和类型也不能随意改变,这导致试验成本高,开发周期长,实现难度较大。随着电子硬件技术的进一步发展,系统仿真技术被提出并广泛地应用于信号测试等领域,它可以降低开发成本,提高嵌入式控制系统的质量,提高系统设计的可用性和可靠性^[1-10]。

目前,国内外许多雷达模拟器广泛采用了系统仿真技术,通过对商用仪器进行二次开发,实现特定需求。在 Agilent 公司标准仪器的应用中,文献[11]利用 ADS 和 Matlab 软件完成基带信号建模,通过 E8267D 矢量信号源产生雷达目标射频信号。文献[12]利用通用仪器信号源,通过 LabVIEW 和 Matlab 软件实现了回波特性的模拟。罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司的张鹏^[13]采用通用矢量信号源 SMW200A 和实时频谱仪 FSW 构建了 DRFM 雷达目标模拟器。文献[14]用计算机结合 National Instruments (NI) 公司的 PCI-5640R 中频卡,配合 Matlab 仿真软件生成了较逼真的雷达模拟回波。上述系统仿真都在信号级一维数据方面进行了模拟实现,也就是只能实现点目标的模拟,并未涉及分布式目标模拟的实现方法。

针对当前的雷达模拟器只能模拟点目标及需要针对不同系统定制化设计的问题,本文提出了一种基于商用现成品或技术(Commercial Off-The-Shelf, COTS)的 SAR 分布式目标模拟器方法,使用标准硬件模组和嵌入式开发技术实现了通用的 SAR 目标模拟,较单一的 FPGA 开发板降低了系统开发、维护和升级带来的高成本和时间消耗,且能精确仿真分布式 SAR 目标。

1 相关技术

1.1 COTS 技术

20 世纪 90 年代,美国国防部提出了 COTS 的商用现成产品策略,“只要允许,在军事装备中采用成熟的民用技术和产品”^[16]。COTS 的含义为商品化的产品和技术,一般地,是利用 COTS 产品去集成测控系统中的硬件设备。该技术一经提出,就得

到了广泛地关注与应用。在军事雷达模拟器方面最具有代表性的是美国 Camber 公司设计的系统模拟与仿真软件 Radar Toolkit,不仅用于 AWG-9、APG-65 等近 20 种雷达,并在 2001 年用该软件为 Raytheon 公司 Airborne Stand-Off Radar (ASTOR) 研制了目标产生器和雷达模拟器(TGARS)^[17]。COTS 技术体现了军方对测试仪器采用开发式工业标准的要求,同时也体现了测试仪器标准向计算机相关标准靠拢的趋势。

COTS 产品具体来说分为两个部分:一是指商业级或工业级的产品,以区别军用级和宇航级;二是市场有满足需求的产品,不需要额外的特殊定制^[18]。基于商品化的产品和技术,一方面,经过民用的产品较为成熟,省去了对设备的研发测试,减少了研发成本;另一方面,产品具有开发式标准定义的接口,可以与商业技术同步,快速升级软硬件。而由于雷达、导弹、卫星等大型军事设备对器件的要求十分严苛,大量的时间金钱等人力物力投入在器件的研发测试上。随着技术的快速发展,早期研发的设备已跟不上时代的脚步,在可靠性、扩展性、兼容性等方面不能满足需求。因此,采用 COTS 技术可以很好地解决上述问题。

目前,国内已有多家研究所、高校、企业等对此进行研究,涉及军事实验、科学研究、资源勘探、环境和灾害监测等众多领域^[19-20]。经过几十年的发展,COTS 产品数量不断增加,质量不断提高,缩短了开发周期,降低了维护成本,逐渐通用化和商品化,已被认为是一种“更好、更快、更便宜”的开发方式。

1.2 目标模拟器

雷达目标模拟器是雷达技术与系统仿真技术的产物,是雷达模拟系统的重要组成部分。雷达目标模拟器主要用来产生包含目标以及环境信息的雷达目标回波信号,将雷达原始信号生成、传播、反射和调制等整个过程通过软硬件的方式复现出来,实现对目标回波信号的高逼真模拟。早期是通过外场模拟实验的方式,第一台雷达模拟器是 20 世纪 50 年代 Moore 利用水箱与压电传感器设计制成的一个声学仿真器,他通过这个声学仿真器复现了雷达信号的传输、延迟、反射和接收的整个过程^[21]。后来,随着硬件研发能力和数字化处理能力的提升,数字信号处理器(DSP)、专用集成电路(ASIC)、

现场可编程门阵列(FPGA)和图形处理单元(GPU)等多种不同类型的芯片被应用于仿真技术^[22-23],大大提高了系统运算性能和存储能力。例如,国防科技大学王超等^[2]通过宽带数字射频存储器和数字合成器实现了雷达目标回波的模拟功能。Meena 等^[3]基于 FPGA 设计了一台通用多级雷达目标模拟器,可以存储雷达脉冲信号并调制信号的多普勒和幅度。通过仿真技术设计实现的雷达目标模拟器,即使在实验室环境下,也可以模拟雷达实际工作过程,实现

目标回波信号的模拟仿真,在雷达系统设计、调制、测试、训练和维护等方面发挥着不可替代的作用。

2 基于 COTS 的 SAR 分布式目标模拟

2.1 系统整体框架

基于 COTS 的 SAR 分布式目标模拟器采用了如图 1 所示的架构体系,分为信号模拟子系统、目标模拟子系统和环路验证子系统 3 个部分。

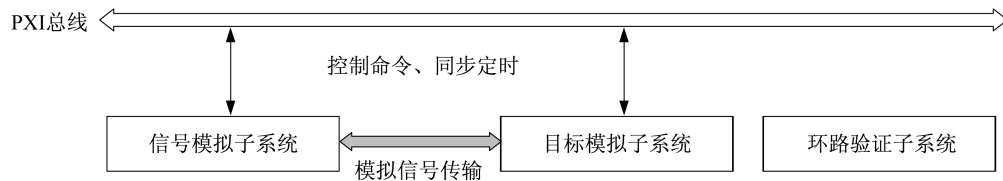


图 1 系统整体架构

Fig.1 Overall system architecture

1) 信号模拟子系统:包括信号的产生和发射以及对信号的接收和调制等,由仿真计算机控制运行。

2) 目标模拟子系统:建立电磁环境模型,计算目标场景的散射信息,并根据散射信息对雷达信号进行调制生成目标回波信号,由仿真计算机控制运行。

3) 环路验证子系统:对雷达接收到的回波数据进行信号和成像算法处理,在仿真计算机上运行,并显示目标仿真结果。

图 1 中,面向仪器系统的 PCI 扩展(PCI extensions for Instrumentation, PXI)总线用于传输控制命令,较 PCI 总线技术增加了用于多板同步和精确定时的触发总线,以及系统参考时钟和用于相邻模块间高速通讯的局部总线来满足高精确定时、同步与数据通信。

构成该目标模拟器的主要硬件设备有:1) NI PXIe-1082 8 槽机箱;NI PXIe-8880 RT 高性能实时控制器;2) NI PXIe-5646R 和 NI PXIe-5840 瞬时带宽达 1 GHz 的矢量信号分析仪(结合一个矢量信号发生器、矢量信号分析仪、高速串行接口和基于 FPGA 的实时信号处理控制);NI PXIe-7902 可重新配置型输入/输出模块

目标模拟器主要采用软硬件结合的方式,机箱选用 NI PXIe-1082 型号,8 个槽位,用户可以自定义选取型号进行组装,开发灵活。本文选用了 4 个

COTS 板卡器件,NI PXIe-8880 作为仿真计算机的主体,进行环路验证;NI PXIe-5646R 作为信号模拟子系统,NI PXIe-5840 和 NI PXIe-7902 作为目标模拟子系统。组装结果实物图如图 2 所示。软件使用 LabVIEW 和 Matlab 结合的方式(如图 3 所示),主要采用模块化的思想进行开发,实现的模块部分包括信号产生模块、信号处理分析模块、射频变频模块、数据采集预处理模块、数据信号处理模块、建模仿真模块以及时序控制模块。各个板卡之间通过时序控制模块实现同步。

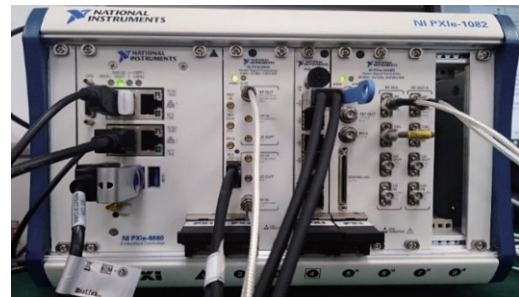


图 2 目标模拟器实物图

Fig.2 Photo of target simulator

2.2 信号模拟子系统

信号模拟子系统主要实现信号的发送与接收,同时可以进行参数设置和检测雷达运行状态。在这个子系统中,我们可以测试雷达工作参数、模拟工作过程和检验仿真结果,从而细化 SAR 系统总体

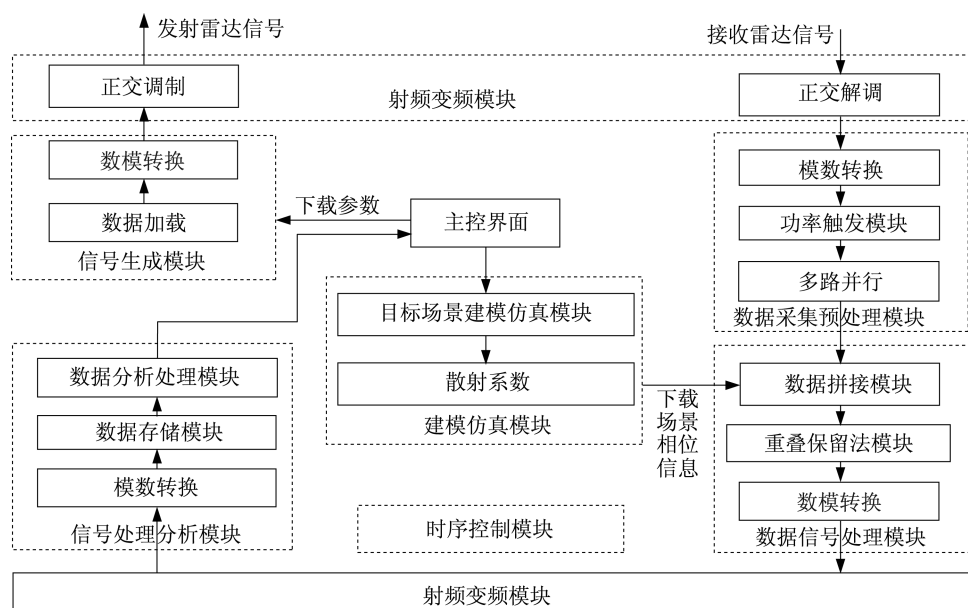


图 3 目标模拟器软件模块化开发框架

Fig.3 Software modular development framework for target simulator

设计技术指标,开展相关的可靠性设计工作。

核心硬件器件为 NI PXle-5646R, 基于 Lab-

VIEW 软件通过矢量信号分析仪和发生器实现的信号发送与接收,如图 4 所示。

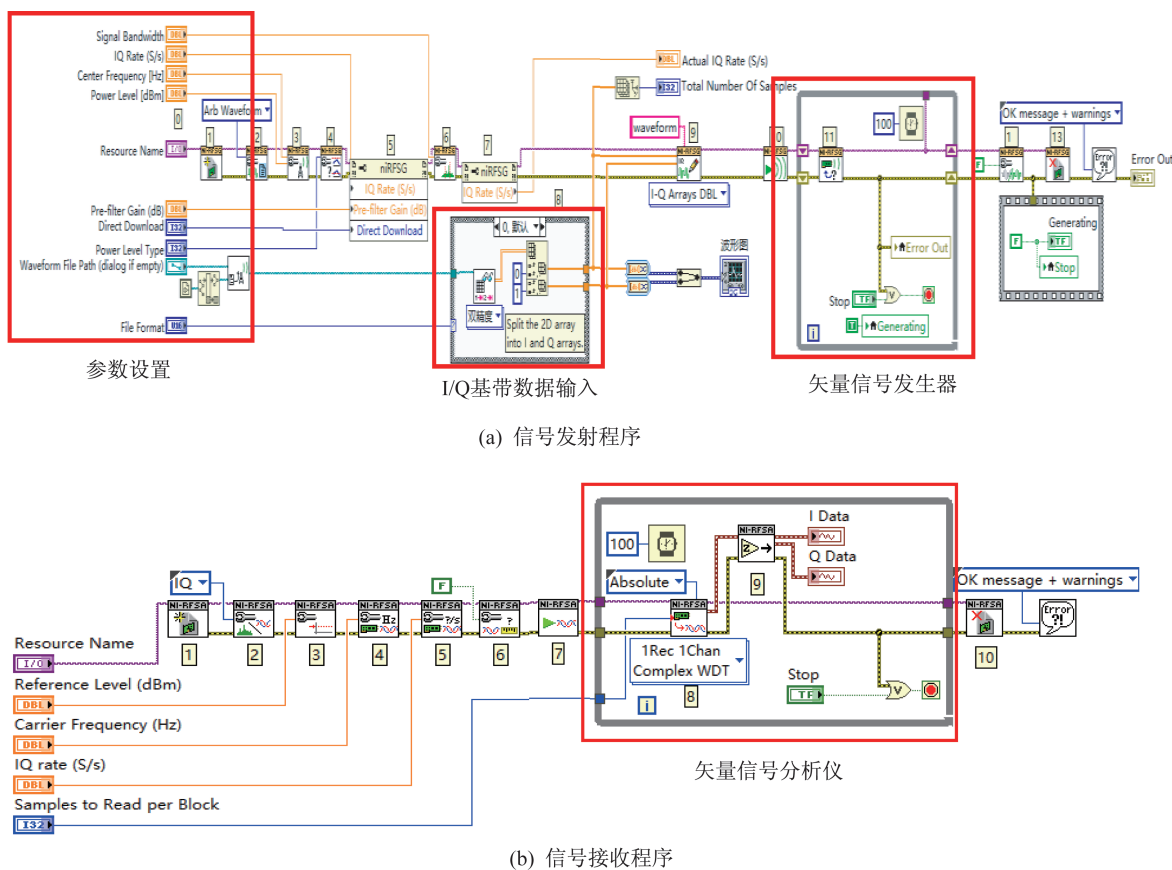


图 4 基于 LabVIEW 设计实现的信号发射与接收

Fig.4 Signal transmission and reception based on LabVIEW design

在信号发送程序中,设置了参数输入端,用户可在界面窗口自定义设置参数。I/Q 基带数据在另一程序中生成,通过接口接入,矢量信号发生器将信号由数字量按照预设参数转为模拟量发射出去。信号接收程序中,矢量信号分析仪将射频变频模块接收到的信号接收存储下来或者传递给其他程序调用。

2.3 目标模拟子系统

雷达实际工作中,其发射的信号经过与地面目标作用后,可以获取目标区域的相关地理信息。目标模拟子系统主要功能是模拟该部分,使得经过该子系统处理后的信号包含预设的目标信息。目标模拟子系统框图如图 5 所示。

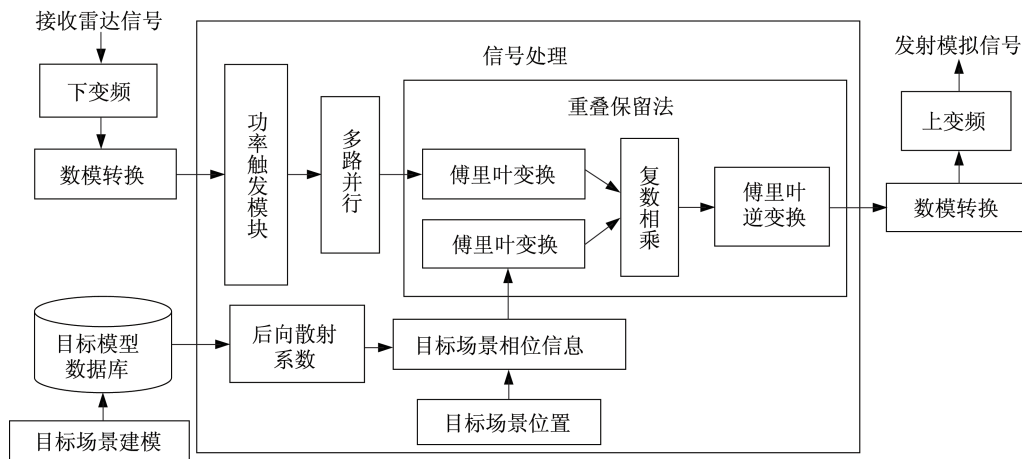


图 5 目标模拟子系统框图

Fig.5 Block diagram for target simulation subsystem

射频变频模块将子系统接收到的雷达信号转换为基带数据,经过与包含目标场景的相位信息数据进行重叠保留法(Overlap and Save, OLS)运算后再发射出去。

目标场景的相位信息主要是目标场景的后向散射系数(RCS)和位置信息。后向散射系数的获取主要是通过电磁建模仿真的方法,在雷达系统参数以及数字高程信息完备的情况下,通过实验室自主研发的散射方法可以很快地获取该参数。同时根据现有的雷达参数,建立了一个地形区域的场景数据库,包含了不同 SAR 系统参数下不同物体不同大小的目标,可以根据实际需求从数据库中提取相应的目标信息,使得系统模拟目标场景能更加快捷精确。

2.3.1 硬件设计实现

由于该平台采用了数字式设计的系统,以 FPGA 为硬件核心进行设计开发,具有高稳定性、高可靠性以及灵活易更改的特点。为了实现目标模拟器对信号的实时处理,同时考虑到采用的硬件资源消耗问题,本文采用了快速卷积算法进行处理。

在该子系统数据处理中,主要的核心部分是系统响应的处理实现,对于数字式系统而言,主要的

两种方法是时域卷积法和频域相乘法。两者的结构原理如图 6 所示,可以看出频域相乘法的数据处理结构比时域卷积法复杂许多,但是频域相乘法对于处理长数据具有很大的优势。一般地,对于 N 点长的信号数据,采用频域相乘法进行一次脉冲压缩处理需要 $N + (3N \log_2 N) / 2$ 次乘法操作和 $3N \log_2 N$ 次加法操作,但是采用时域卷积法则乘法需要 N^2 次,加法需要 $N(N+1)$ 次。

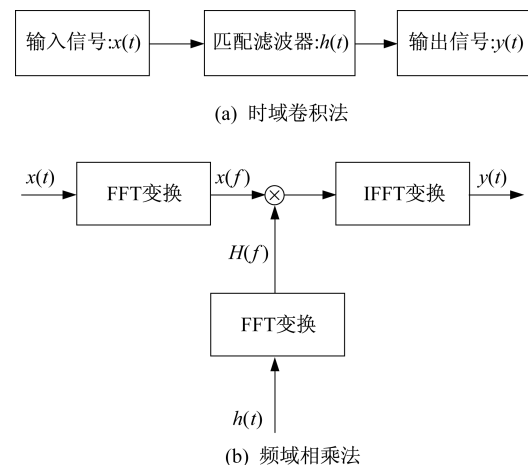


图 6 数字式系统常用的系统相应处理方法的流程图

Fig.6 Structure diagram of the corresponding processing method commonly used in digital systems

当回波数据量 N 点很大时,对系统而言,也需要对滤波器进行大量的补零处理。额外的运算量会增加系统负担,占据软硬件资源,增加工程的实现难度,选用频域相乘法会降低这种情况带来的影响,具有很大的优势,本系统就属于这种情况。同时,基于频域相乘法采用了可以实现快速卷积运算的重叠保留法 OLS^[24]。这个核心思想是对信号分段进行频域操作,可以避免由于等待数据而造成的时间延迟,提高系统运算的实时性。

重叠保留法是计算有限长序列 $h(n)$ 与无限长序列 $x(n)$ 的线性卷积 $y(n)=x(n)*h(n)$ 的有效方法。

它的运算步骤如下:

步骤 1 将长序列分为若干段序列,第一段前

面添加 $Q-1$ 长度的 0,第 1 段末尾的 $Q-1$ 长度数据为下一段开头的 $Q-1$ 数据,也就是从第 2 段开始每一段的前 $Q-1$ 数据是上一段最后的 $Q-1$ 数据,这样使得划分后的每段长度均为 N 。

步骤 2 对每一个分段序列与滤波器 $H(m)$ 进行傅里叶变换、傅里叶逆变换。

步骤 3 每段卷积后的结果去掉前 $Q-1$ 长度的数据点后,依次进行相连。

2.3.2 软件设计实现

为了实现高性能的数据实时采集、存储、处理、传输等操作,主要通过 LabVIEW 软件中实时(Real time, RT)模块和 FPGA 模块,直接在 FPGA 芯片端操作,实现数据采集预处理模块和数据信号处理模块。FPGA 和 RT 程序流程如图 7 所示。

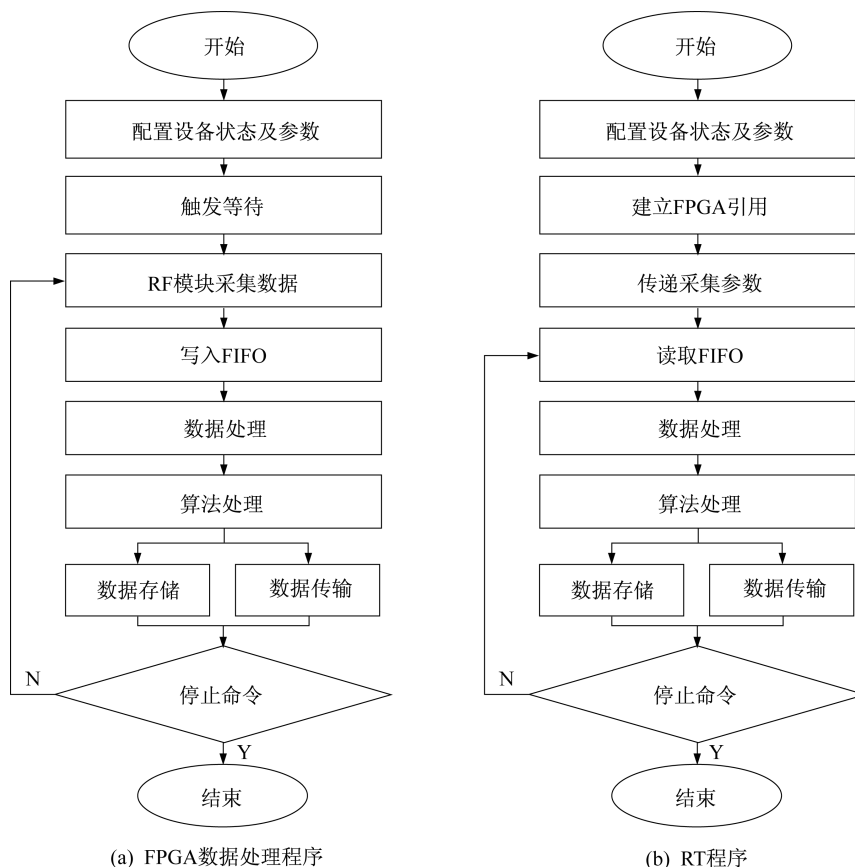


图 7 程序流程框图

Fig.7 Flowchart of programs

FPGA 数据处理程序负责控制数据处理实现高速数据采集,RT 程序负责对数据传输、处理和分析等操作,在保证数据完整性的同时提高了运算效率。

2.4 环路验证子系统

环路验证子系统选用了 NI PXIe-8880 型号的控制器件,实现环路运行的验证工作和各个板卡之间的交互通信。如图 8 所示,该子系统采用了人性

化的界面显示,包括参数设置界面、状态显示界面和数据处理结果显示界面。其中,参数设置界面和状态显示界面主要由 LabVIEW 开发,参数设置界面包括雷达工作状态设置、信号参数设置和建模仿

真设置等;状态显示界面实时显示各个设备的状态信息;数据处理结果显示界面主要由 Matlab 开发,调用了丰富的可扩展的模型库,对数据结果进行自定义的数据处理和分析。

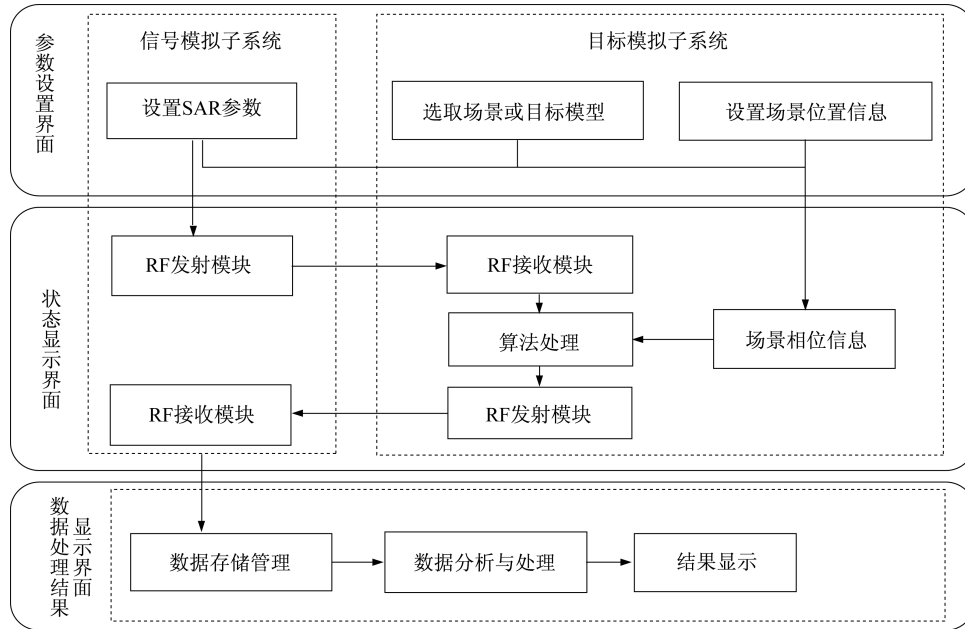


图8 环路验证子系统程序框图

Fig.8 Block diagram of the loop verification subsystem

NI PXIe-8880 将经过信号模拟子系统和目标模拟子系统的信号,进行信号处理和成像算法处理,生成相应雷达系统参数下的场景成像结果,从而验证系统的实际效果。

2.5 系统运行流程

基于 COTS 的 SAR 分布式目标模拟的仿真流程如图 9 所示,具体步骤如下:

步骤 1 设置雷达信号参数以及硬件调试参数,包括信号带宽、脉冲宽度、中心频率、增益控制等。

步骤 2 添加目标场景,设置目标场景的位置信息,获取在设置参数下目标场景的后向散射系数。

步骤 3 运行目标模拟子系统,根据设置的参数获取目标的相位项信息,下载到 FPGA 程序中;同时 NI PXIe-5840 中射频变频模块处于接收信号就绪状态,检测是否有有效信号存在。

步骤 4 运行信号模拟子系统,NI PXIe-5646R

中矢量信号发生器发射线性调频信号。

步骤 5 处于就绪状态的目标模拟子系统一旦接收到信号,信号将通过数字下变频处理得到的 I、Q 两路基带数据,通过 DMA FIFO 方式将数据传递到 FPGA 上。

步骤 6 数字信号在 FPGA 芯片上以数据流的形式传送给 FFT 模块,同时原先存储在存储器中系统响应系数也就是场景相位项信息也传送给 FFT 模块,两者进行算法调制,运算完成的数据以数据流的形式传送回 NI PXIe-5840 设备。

步骤 7 NI PXIe-5840 通过矢量信号发生器中的射频变频模块,将数字信号转化为模拟信号进行转发。

步骤 8 NI PXIe-5646R 接收回波信号,通过矢量信号分析仪得到 I、Q 两路基带信号,对数据进行存储。

步骤 9 NI PXIe-8880 对存储的数据进行信号处理和成像算法,结果在人机交互式界面上显示。



图9 系统运行流程框架

Fig.9 Framework of system operation process

3 实验结果

本文采用的硬件设备PXIe-5646R频率范围为65 MHz至6 GHz, PXIe-5840频率范围为5 kHz至6 GHz, 瞬时带宽可达1 GHz。测试参数见表1, 测试的分布式目标选用了舰船模型、ZSU234型号坦克和ZLI31型坦克。

以一艘舰船为例, 本文首先验证了SAR成像模拟算法的性能, 如图10所示, 分别获取了舰船目标的模拟SAR图像、微波暗室实测成像(1:50缩比), 并与舰船的真实SAR图像进行对比。可以看出, 模拟SAR成像结果能准确反映出舰船目标的强散射点信息, 并且强散射点的分布与暗室实测结果及真

表1 系统仿真参数

Tab.1 System simulation parameters

参数	数值
中心频率/GHz	1.0
带宽/MB	200
脉冲宽度/ μs	5.7
轨道高度/km	600
速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6 000
下视角/ $^{\circ}$	50
OLS算法中FFT的长度	256

实SAR成像结果一致, 由此可以验证所采用电磁散射计算方法及模拟SAR成像算法的精度和性能。

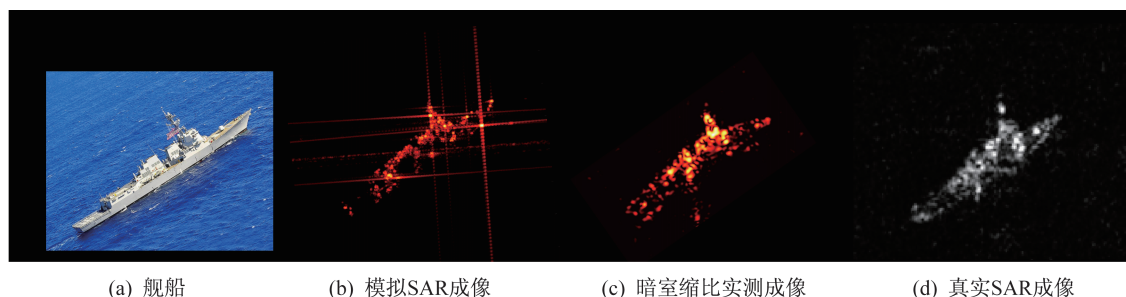


图10 SAR成像仿真性能验证

Fig.10 Performance validation of SAR imaging simulation

为了验证该方法可以对分布式目标进行模拟,环路验证子系统对接收到的射频回波信号进行了信号处理和成像算法处理。图 11(a)和图 11(b)分别对应为目标后向散射系数和软件仿真结果,图 11(c)

为经过处理后的 SAR 分布式目标的硬件测试结果。雷达系统工作模式设置的是具有小斜视角的条带式 SAR,成像算法采用的是距离多普勒算法。

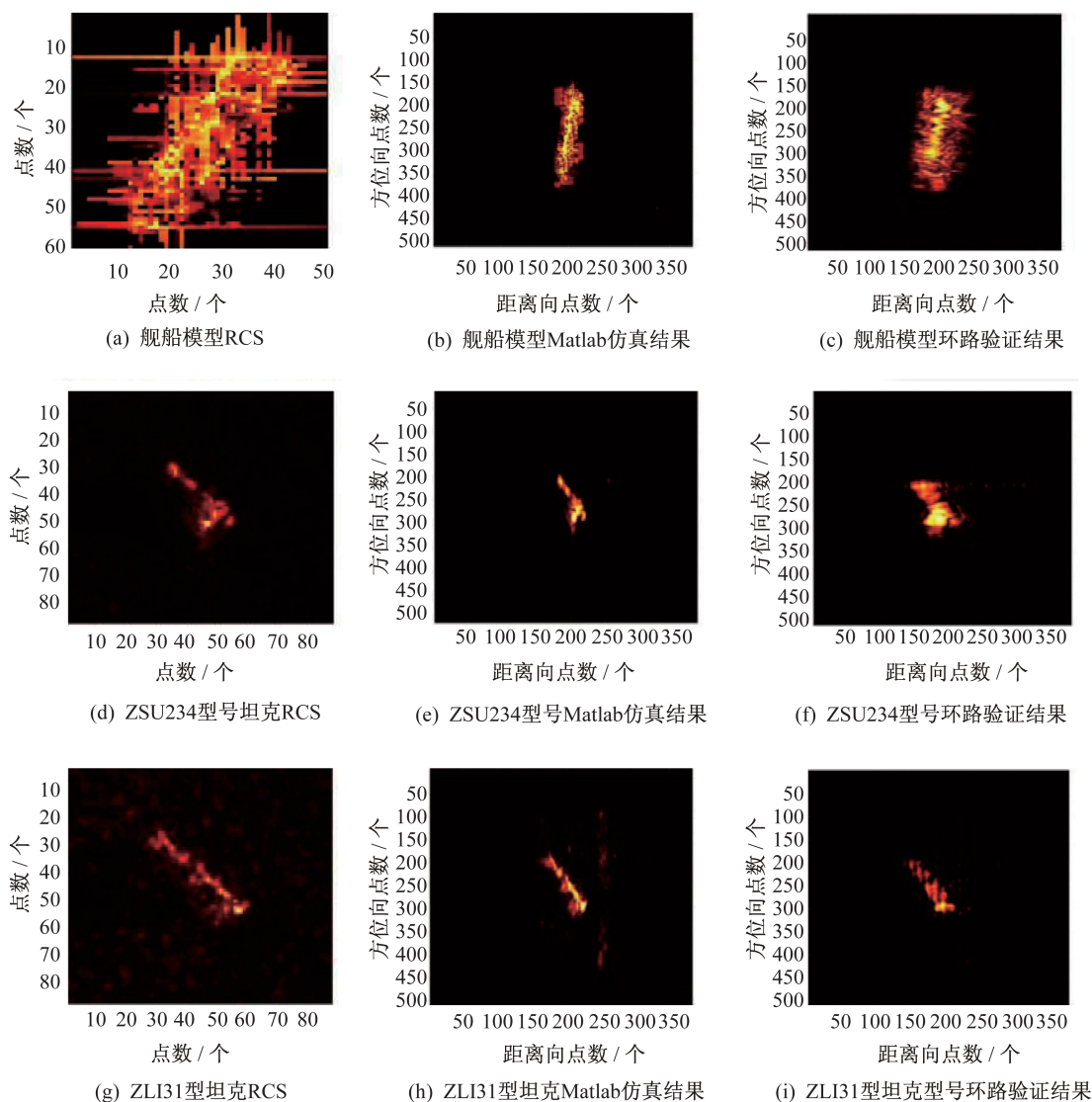


图 11 不同目标模拟的环路验证结果

Fig.11 Loop verification results for different target simulations

从图 11 可以看出,本文提出的目标模拟方法可以模拟分布式目标的射频信号输出。同时,用户可以在仿真软件中自定义设置参数,满足不同的性能需求。在改变仿真参数或仿真目标下,进行了多次仿真测试,均取得了相同的结果。在对系统进行设计时,在实时性和精度之间做了权衡,减少系统响应数据长度会降低目标精度,但也减少了数据运算量,增加了系统的实时性。

本文完成了从信号模拟、目标模拟到环路验证的闭环仿真验证流程,验证了该目标模拟方法具有在环仿真的能力,可以通过调整信号输入模式,采用模拟信号或外部信号输入的方式,产生灵活的射频信号输出。

4 结束语

本文提出了一种基于 COTS 的 SAR 分布式目

标模拟方法,通过LabVIEW和Matlab软件对NI PXI 货架式功能模块进行集成设计。1) 在数据处理方面,FPGA协同各个物理部件完成目标模拟器主要的存储、运算和时序控制功能,具有高可靠性和稳定性;2) 在接口方面,选用工业标准总线以及板卡组合的方式,用户可以灵活组装,具有通用性和兼容性;3) 在研发成本方面,降低了系统开发、维护和升级带来的高成本和时间消耗,避免针对不同系统进行重复定制化开发;4) 在模拟能力方面,更具有通用性和扩展性,可以实现多种雷达信号和分布式目标的模拟,通过主控软件界面进行相关设置以满足不断更新的更复杂的雷达目标模拟需求。

参考文献

- [1] 陈洪源,戴庆芬.高精度全可编程雷达视频回波模拟仪[J].电讯技术,1994(5):1-6.
- [2] 王超,李毅,袁乃昌.高分辨雷达目标回波模拟器设计[J].系统工程与电子技术,2007(8):58-60.
- [3] MEENA D, TANIZA R, PRAKASAM L. Design of multilevel radar target simulator [C]// Radar Conference. 2007:203-208.
- [4] SHAHID U, QADIR S, HAIDER Z, et al. Design and implementation of multi mode radar target simulator using direct digital synthesizer [C]// International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. 2009:155-158.
- [5] ROY T, MARNDI S, JADIA K, et al. FPGA based design of generic multilevel built in test equipment for radars [C]// IEEE Radar Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012:769-773.
- [6] BUFFALO C G. Pcs-300 radar simulator [EB/OL]. (2018-02-18) [2020-03-01]. <https://www.buffalocomputergraphics.com/content/documents/Maritime/PCS-300.pdf>.
- [7] Instruments National. Electronic warfare simulation system [EB/OL]. (2013-07-16) [2020-03-01]. <http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-13403#>.
- [8] 张张.雷达高度表动态环境模拟理论与技术研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [9] 苗元晓.频控阵雷达模拟器硬件平台设计[D].成都:电子科技大学,2019.
- [10] 沈静波,田枫影.面向复杂场景的反导雷达模拟器设计[J].雷达科学与技术,2019,17(2):208-212.
- [11] 吕茂亮.雷达射频信号的产生及其性能评估方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2009.
- [12] 高世鹰,张海,傅焯.基于LabVIEW与Matlab混合编程的雷达回波起伏特性模拟[J].现代电子技术,2007(11):7-9.
- [13] 邹练锋,梁兴东,王宇,等.基于虚拟仪器的雷达信号模拟系统[J].微计算机信息,2008(7):97-99.
- [14] 任宇峰,何强,韩壮志,等.基于虚拟仪器技术的雷达信号模拟器设计[J].现代电子技术,2010(19):75-78.
- [15] 张鹏.基于通用仪器的DRFM雷达目标模拟器实现[J].现代雷达,2015,37(8):81-85.
- [16] AVRAMENKO S, VIOLANTE M. RTOS solution for noc-based cots mp soc usage in mixed-criticality systems [J]. Journal of Electronic Testing, 2019, 35: 29-44.
- [17] BAIR G L. Advances in airborne radar simulation [EB/OL]. (2015-09-10) [2020-03-01]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.6349&rep=rep1&type=pdf>.
- [18] 李瑞,黄影,李毅.基于COTS的空间计算机平台的研究[C]//中国计算机大会.北京:中国计算机学会,2005:1-8.
- [19] 王立.美海军COTS技术应用对我军的启示[J].舰船电子工程,2015(7):35-41.
- [20] 钟贵廷,晏坚,匡麟玲,等.基于COTS器件的小卫星发展历史与最新动态[C]//全国通信与信息技术学术年会.2013:1-4,62.
- [21] BAIR G L. Airborne radar simulation [R]. Dallas, Texas: Camber Corporation, 1996.
- [22] 王展,李双勋,刘海涛,等.雷达多目标模拟器DRFM单元设计[J].计算机测量与控制,2009,17(8):1616-1619.
- [23] 韩宁,庞郁,李育红,等.基于DSP的海防雷达目标模拟器的设计与实现[J].现代电子技术,2014(9):12-14,19.
- [24] ZOU X, MURAMATSU S, KIYA H. The generalized overlap-add and overlap-save methods using discrete sine and cosine transforms for FIR filtering [C]// International Conference on Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1996:1-10.