CN 53-1189/**P ISSN** 1672-7673

基于 ROACH2 的数字终端实验平台搭建*

张 萌^{1,2},张海龙^{1,2,3},王 杰¹,李 健¹,托乎提努尔¹

(1. 中国科学院新疆天文台,新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 中国科学院射电天文重点实验室,江苏南京 210008)

摘要:面向天文信号实时处理的需求,搭建了基于 ROACH2 的射电天文数字终端实验 平台。利用 MATLAB, Xilinx 等开发环境进行仿真,取得了原始实验数据;利用 CASPER 硬 件平台实现了信号控制和预处理,并通过高速以太网将数据包传输至计算服务器进行后处 理。搭建的实验平台实现了仿真、编译、运行的完整流程,为天文信号实时处理研究提供了 良好的实验环境。

关键词:数字终端; ROACH2; 实验平台; CASPER 中图分类号: P111.44 文献标识码: A 文章编号: 1672-7673(2020)02-0244-08

采用多波束及相控阵馈源^①(Phased Array Feed, PAF)接收技术使射电观测获取的天文信号数据量 成倍增长,观测数据需要实时处理来克服传输和存储速度的瓶颈。应用高速宽带数字终端^[1]进行信 号的实时处理,可以满足未来海量数据实时处理的需求,当前数字终端系统主要包括对天文信号控制 和预处理的可编程硬件平台和进行控制及复杂处理的高性能计算系统。

CASPER^[2](Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research)的硬件平台因其 免费、开源、可重用,得到许多大型射电望远镜的数字终端平台使用。美国绿岸望远镜(Green Bank Telescope, GBT)的脉冲星终端系统 GUPPI^[3](Green Bank Ultimate Pulsar Processing Instrument)、阿雷 西博射电望远镜(Arecibo Radio Telescope)使用的脉冲星终端 PUPPI²(The Puerto Rico Ultimate Pulsar Processing Instrument),以及澳大利亚帕克斯望远镜(Parkes)的 CASPSR^[4](CASPER Parkes Swinburne Recorder)均采用 CASPER 早期的硬件系统 IBOB^[5](Interconnect Break-out Board)和 BEE2^[6](Berkeley Emulation Engine)。美国绿岸望远镜的 VEGAS³,德国埃费尔斯贝格(Effelsberg)的 PSRIX^[7]终端,以 及澳大利亚帕克斯的 BPSR^[8](Berkeley Parkes Swinburne Recorder)采用了第1代 ROACH(Reconfigurable Open Architecture Computing Hardware)系统构建,利用多台 ROACH 进行通道划分,将来自 IBOB 和 BEE2 平台的信号合并到一个板中。我国贵州 500 米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST)^[9-10]、上海天马望远镜(Tianma)^④均使用 ROACH2^⑤构建终端系统进行频率 通道划分,完成高速数据流处理。

为进一步研究现有的数字终端系统,实现高速天文信号的实时处理,需要构建稳定的实验平台, 为高速天文信号实时处理研究提供良好的实验环境,由于 CASPER 的数字终端软硬件平台通用性和 开源性,本文基于 CASPER 软硬件实现了实验平台的搭建,并对所搭建的实验环境进行了系统测试。

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(11873082,11803080);国家重点研发计划(2018YFA0404704);中国科学院青年创新促进会; 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助.

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2019-06-24

作者简介:张 萌,女,硕士.研究方向:数据密集型研究.Email:zhangmeng@xao.ac.cn

通讯作者:张海龙,男,正高级工程师.研究方向:数据密集型研究.Email:zhanghailong@xao.ac.cn

¹⁾ https://www.skatelescope.org/phased-array-feed/ 2) https://www.naic.edu/puppi-observing/

³ http://www.gb.nrao.edu/vegas/report/

④ http://radio.shao.cas.cn

⁽⁵⁾ https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/ROACH2

1 硬件平台

CASPER 团组研发设计的许多设备都是基于 Xilinx 公司的现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)^[11]芯片,通常典型的 CASPER 信号处理平台都有一个或者两个模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)与其连接,进行信号采集和少量的预处理,然后通过网络链路将数据发送 到其他现场可编程门阵列板或者中央处理器、图形处理器,进行复杂的信号处理。目前可用的 CASPER 支持的现场可编程门阵列板有 IBOB, ROACH 系列和 SKARAB, SNAP 系列。本文搭建的实验 平台选用稳定且使用较广泛的硬件平台 ROACH2,实物如图 1。



图 1 ROACH2 实物图 Fig. 1 The picture of ROACH2

ROACH 系列板卡是可重构开放式计算机硬件体系结构,是用于射电天文信号处理的独立可编程 平台。ROACH2 是 ROACH 系列的最新版本,使用 Xilinx Virtex-6[®] 系列现场可编程门阵列,保留了 ROACH 的优点,但在处理能力、输入/输出(I/O)吞吐量和内存带宽方面提高了总体性能。它使用与 ROACH 相同的 PowerPC 440EPx,但是增加了用于芯片内部测试的联合测试工作组^⑦(Joint Test Action Group, JTAG)接口。

如图 2,从结构上看,ROACH2 硬件平台主要分成 5 个相互独立的子系统,包括现场可编程门阵 列子系统、处理器子系统、板卡管理子系统、测试调试子系统和信号存储子系统。核心部分是 Virtex-6 系列 XC6VSX475T FPGA,用于信号处理;PowerPC 440EPx 独立处理器运行简易 Linux 系统提供控制功能;4个36×2 M 的四倍数据倍率(Quad Data Rate 2,QDR2)SRAMs,以及单个72 bit 的 DDR3 RDIMM(Registered Dual In-line Memory Module)卡槽连接到现场可编程门阵列,可用于数据计算与存储;两个 ZDOK 接口,用于连接模数转换器等设备,4个 SFP+(Quad SFP+ Mezzanine board)端口,支持多达 8×10 GE 的数据链路,能够将数据包向下一级高速输出。

⁶ https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds150.pdf

⑦ https://zh.wikipedia.org/wiki/JTAG



246

2 软件环境

CASPER 工具包提供了一个用于硬件平台的设计环境。主要组件简称 MSSGE[®](MATLAB/Simulink/System Generator/EDK), MSSGE 工具包是针对基于 CASPER 硬件平台的一个软件开发平台,它们整合在一起,形成一个设计和开发的平台环境。这个开发环境早期是由伯克利无线电研究中心为伯克利 仿真引擎(Berkeley Emulation Egine, BEE)硬件平台设计开发的 BEE_XPS 工具包,后来升级扩展到可 以通用的 CASPER 硬件平台。开发环境提供了图形化的设计界面,使用 Xilinx 系统生成工具包,使得 设计编译实现过程整体化。

MSSGE 工具包的各个组件中, MATLAB 为 Simulink 提供了一个可编写脚本的后端, 所有脚本均 可通过 MATLAB 实现。Simulink 既可作为 CASPER ROACH2 的系统模型的原理绘图工具,也可作为 一种高层次的用于信号处理系统设计的仿真环境。系统生成器(System Generator)可以用于现场可编 程门阵列编程实现,是 Xilinx 公司的系统级设计工具,可以将其理解成一个转换工具,自动地将 Simulink 中设计的抽象模块映射成可靠的硬件实现^[12]。系统生成器在编译期间将 Simulink 原理图转 换为 HDL 代码(VHDL 或 Verilog),大大简化了开发数字信号处理算法的设计过程。嵌入式开发套件 (Embedded Development Kit, EDK)用于现场可编程门阵列的嵌入式开发, CASPER 硬件的编译基于 Xilinx EDK,通过它能够将上一步生成的硬件描述语言的代码编译成比特流文件并转换成操作系统可 执行的 bof 文件, EDK 是 ISE 的扩展功能工具集合。

该实验平台软件可搭建在 Ubuntu x64, RHEL, CentOS x64 系统上。经过实际测试 MALTAB 服务包与 Xilinx 的 XSG,系统生成器存在版本兼容差异,须下载对应版本的 MATLAB 和 Xilinx 以及相应 MSSGE 库。

本文以系统 CentOS 7, 软件 MATLAB 2012b, Xilinx14.7 为例说明,环境搭建流程如图 3,在 CentOS 7 上依次安装 Xilinx14.7, MATLAB2012b。工具包需要两个库,即 DSP 块的 CASPER 库和硬 件支持块的 BEE XPS 库,现在两个库已捆绑在一个 mlib_devel 目录中,用户可以从 github 下载,需 要注意的是,在开发环境搭建过程中,应注意软件版本、安装路径与库文件存放路径一致。



Fig. 3 Flow chart of software installation

在 Xilinx14 版本中删除了 ROACH2 依赖的部分模块,这些模块存在于 EDK 中,称为 pcores (peripheral cores),因此,需要将删除的部分复制到 XPS_ROACH2_base/pcores 文件夹中进行更新。 下载并安装完成后,编辑 startsg 的默认路径为文件存放的真实路径。更改完成后直接运行 startsg,即 可启动 MATLAB,等待成功导入 Xilinx 库和 CASPER 库后可进行设计工作。

3 实验分析

实验平台的软硬件系统搭建完成后,需要实例验证其可用性。本文利用 CASPER 平台提供的实例对搭建的平台进行测试。

实例测试实现了从平台软件设计到硬件执行的完整处理流程,如图 4。使用 MATLAB 中的 Simulink 进行设计、仿真,使用 casper_xps 编译文件,文件编译生成可执行文件后,将后缀名为 bof 的可执行 文件上传到 ROACH2 平台的相应文件夹中,通过 Python 脚本远程控制文件在 ROACH2 上执行。

⑧ https://casper.ssl.berkeley.edu/wiki/MSSGE_Toolflow



Fig. 4 Flow chart of experimental process

首先在 Simulink 编译界面进行图形化设计。创建新的仿真图形,添加 Xilinx 系统生成器和 XSG 核心配置块,然后按照描述的设计构架图,通过定位库基本元素选择需要的模块,并设置参数,搭建 完整的顶层设计结构,本文以建立宽带频谱仪为例,其整体图形化程序如图 5。在 Simulink 中建立架 构图时主要应用 3 个库: CASPER XPS 库,包括封装了硬件之间接口等的黄色块; CASPER DSP 库, 包括实现输出 DSP 功能等的绿色块; Xilinx 库,提供复用、延迟、添加等低级功能的蓝色块。

在 Simulink 中的设计完成之后,可直接在其内部进行仿真,确保在编译之前没有错误,点击顶部 工具栏中的执行按钮,即可实现仿真。如有错误则弹出诊断窗口,可以单独处理,有些设计也可以查 看示波器中的显示是否与设置一致,以判断对错。

验证设计功能正确后,需将其编译成现场可编程门阵列可以识别的代码。在 MATLAB 中输入指 令 casper_xps,启动编译器模块,这时会弹出如图 6 的编译界面,所有选项保持默认,确保列出的设 计是想要编译的,然后单击 gcs 返回最近选择的模块所在的系统路径,最后单击 Run XPS 开始编译。 经过较长一段时间的等待,编译正确并且完成之后,弹出一个编译成功的对话框,如图 7。

编译通过后在右侧文件夹目录栏显示生成了多个文件,其中,在 bit_files 文件夹中能够找到后缀 名为 bof 的二进制文件,*.bof 文件即是可以在 ROACH2 上运行的文件。

设计、仿真、执行、编译等过程都在 CASPER 的软件开发平台上实现,要在硬件平台 ROACH2 上 执行下一步操作,需要将编译生成的 bof 文件上传到 ROACH2 平台相应文件夹中。经过多次尝试,针 对 bof 文件上传,建议采用网络文件系统(Network File System, NFS)方式,远程挂载其它服务器相关 目录到 ROACH2 平台相应目录,这样只需复制 bof 文件到服务器上即可实现 bof 文件上传。远程控制 将编译的可执行文件在 ROACH2 上运行,完成配置和通信并实现显示输出。

本文以建立 2 048 通道的频谱仪为例,使用 BPSG4[®] 信号发生器产生 800 MHz 时钟信号,将时钟 源连接到模数转换器上的 clk_i,并将 ROACH2 的时钟频率设置为 200 MHz,输入信号由模数转换器 数字化产生 4 个并行时间序列。利用 python 控制频谱仪在 ROACH2 上执行,将其转换为频域信号, 最终输出频谱。

实验过程中,首先利用噪声源产生宽带信号,再利用带宽为98~122 MHz的带通滤波器选择指定范围内的频率分量,积分60次时的信号频谱如图8。

搭建的实验平台可以通过 10 GbE 的 SFP+端口实现实验平台硬件设备之间的数据传输,通过 PPC 的 1 GbE 端口读出预处理数据,通过 ZDOK 端口传输模数转换器数字化信号到现场可编程门阵列;可在 Simulink 设计中嵌入 HDL 定义的模块并进行实例化,创建新的 Xilinx 模块、CASPER 模块;利用 Simulink 和 CASPER 库中的模块,可以构建新的硬件设计,实现相关的天文信号处理功能。经过测试,本文搭建的实验平台可满足射电天文数字终端算法测试的需求。

由于操作系统及应用软件版本不断更新并且相互不兼容,在实验过程中遇到了一系列版本不匹配问题。由于软硬件平台的更新换代,设计模块也在不断修正、替换、弃用、添加等,都影响对不同版本库的调用,在建设过程中遇到了模块版本老、EDK版本落后、参数不存在等报错提示,通过尝试替换不同版本的软件包解决了相关问题。CASPER教程说明现已不在原网站上更新,本文实验平台搭建涉及的库、实验中的 bof 文件可以到新疆天文台数据中心下载,网址 http://data.xao.ac.cn/static/RAOCH2_platform.tar.gz。

⁽⁹⁾ https://www.aaronia.com/products/signal-generators/Signal-Generator-BPSG4/











OK







4 总 结

本文根据射电天文海量信号实时处理的需求,对数字终端系统环境建设进行了研究,借助通用性 良好的 CAPSER 硬件开发平台及其相应软件环境,搭建了基于 ROACH2 的数字终端系统实验平台。 利用 CAPSER 提供的示例对搭建的实验平台进行了测试、调试和分析,实现了相关实例设计、仿真、 编译、运行的完整过程。实验结果表明,本文所搭建的平台运行平稳、可靠。目前所搭建的数字终端 环境已经应用在脉冲星信号仿真处理、射频干扰抑制算法测试和高速数字信号传输等相关研究领域。

参考文献:

- 杨文军,杨军,江悟,等.新疆天文台南山站 DBBC2 数字终端系统的建立 [J]. 天文研究 $\lceil 1 \rceil$ 与技术, 2018, 15(1): 32-39.
- $\begin{bmatrix} 2 \end{bmatrix}$ WERTHIMER D, 257 CASPER Collaborators at 68 institutions. The CASPER collaboration for high performance open source digitalradio astronomy instrumentation [C] // Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium. 2011.
- [3] RANSOM S M, DEMOREST P, FORD J, et al. GUPPI: Green Bank ultimate pulsar processing instrument [C] // Proceedings of American Astronomical Society Meeting. 2009.

_ ×

- SARKISSIAN J M, CARRETTI E, VAN STRATEN W. The Parkes pulsar backends [C] // Proceedings of AIP Conference. 2011: 351-352.
- [5] PARSONSA R, BACKER D C, SIEMION A, et al. A scalable correlator architecture based on modular FPGA hardware, reuseablegateware, and data packetization [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2008, 120(873); 1207-1221.
- [6] CHANG C, WAWRZYNEK J, BRODERSEN R W, et al. BEE2: a high-end reconfigurable computing system [J]. IEEE Design & Test of Computers, 2005, 22(2): 114-125.
- [7] LAZARUS P, KARUPPUSAMY R, GRAIKOU E, et al. Prospects for high-precision pulsar timing with the new Effelsberg PSRIX backend [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 458(1): 868-880.
- [8] KEITH M J, JAMESON A, VAN STRATEN W, et al. The high time resolution universe pulsar survey I: system configuration and initial discoveries [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2010, 409(2): 619-627.
- [9] 南仁东,李会贤. FAST 的进展-科学、技术与设备 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014,44(10):1063-1074.
- YU Y Z, PENG B, LIU K, et al. FAST ultra-wideband observation of abnormal emission-shift events of PSR B0919+06 [J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2019, 62 (5): 36-41.
- [11] 赵盼孜, 李彬华, 毛栊哗, 等. 基于现场可编程门阵列的幸运成像算法的实现 [J]. 天文研究与技术, 2019, 16(2): 236-243.
- [12] 纪志成,高春能,吴定会. 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.

The Construction of Digital Backend Experiment Platform Based on ROACH2

Zhang Meng^{1,2}, Zhang Hailong^{1,2,3}, Wang Jie¹, Li Jian¹, Tohtonur¹

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China, Email: zhanghailong@xao.ac.cn;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: An experimental platform of radio astronomy digital backend based on ROACH2 was built for the real-time processing requirements of astronomical signals. Using MATLAB, Xilinx and other development environments to simulate the process of astronomical signals, and the raw data were obtained; the signal control and pre-processing were realized by CASPER hardware platform, and the data packet was transmitted to the computing server through high-speed Ethernet for post-processing. The experimental platform has realized the complete process of simulation, compilation and operation, and provided a good experimental environment for the real-time processing of astronomical signals.

Key words: Digital backend; ROACH2; Experimental platform; CASPER

[4]