

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/334301593>

Pulsar digital backend technologies review

Article · January 2019

DOI: 10.1360/SSPMA-2019-0007

CITATIONS

3

READS

105

14 authors, including:



Na Wang

Inner Mongolia University

26 PUBLICATIONS 37 CITATIONS

SEE PROFILE

Pulsar digital backend technologies review

张海龙, 张萌, 聂俊, 托乎提努尔, 朱艳, 王博群, 王万琼, 王杰, 冶鑫晨, 李嘉, 裴鑫, 李健, 王娜, 姜鹏 and 朱岩

Citation: 中国科学: 物理学 力学 天文学 **49**, 099503 (2019); doi: 10.1360/SSPMA-2019-0007

View online: <http://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSPMA-2019-0007>

View Table of Contents: <http://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/SSPMA/49/9>

Published by the 《中国科学》杂志社

Articles you may be interested in

[Digital monitoring of agro-ecosystems indicators on the basis of space and unmanned technologies](#)

BIO Web Conf. **17**, 00113 (2020);

[Digital assembly technology based on augmented reality and digital twins: a review](#)

Virtual Reality & Intelligent Hardware **1**, 597 (2019);

[A comprehensive review on proppant technologies](#)

Petroleum **2**, 26 (2016);

[A review on forming technologies of fibre metal laminates](#)

International Journal of Lightweight Materials and Manufacture **4**, 110 (2021);

[Mechanized technologies for scaffolding cultivation in the kiwifruit industry: A review](#)

Information Processing in Agriculture **5**, 401 (2018);



脉冲星数字终端技术综述

张海龙^{1,2*}, 张萌^{1,3}, 聂俊^{1,2}, 托乎提努尔^{1,3}, 朱艳^{1,3}, 王博群^{1,3}, 王万琮¹, 王杰¹, 冶鑫晨¹, 李嘉¹, 裴鑫¹, 李健¹, 王娜^{1,2}, 姜鹏⁴, 朱岩⁴

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

*联系人, E-mail: zhanghailong@xao.ac.cn

收稿日期: 2019-01-07; 接受日期: 2019-02-25; 网络出版日期: 2019-06-17

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)、国家重点研发计划(编号: 2018YFA0404704)、国家自然科学基金(编号: 11873082, U1531125, 11803080, 11503075)和中国科学院青年创新促进会资助项目

摘要 脉冲星数字终端是脉冲星观测和搜寻的重要设备, 可实现模拟信号的数字化及脉冲星信号处理. 随着脉冲星研究的不断深入和数字技术的迅速发展, 对脉冲星数字终端的性能要求也在不断提高, 需要在更宽带宽、更高的时间分辨率与更高的频率分辨率下进行高速采样、实时分析与处理. 本文以国内外主要脉冲星观测射电望远镜为基础, 回顾了脉冲星终端的发展历史, 综述了目前主流大口径射电望远镜脉冲星数字终端的现状. 在调研和分析已有和正在研制的脉冲星数字终端的基础上, 构思和讨论了采用开放RFSoc平台+GPU集群为基础的QTT终端系统的设计方案和研制思路.

关键词 脉冲星, 数字终端, 射电望远镜, RFSoc, GPU

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

1 引言

脉冲星是一种快速自转并具有强磁场的中子星, 它与类星体、宇宙微波辐射和星际有机分子一起被誉

为20世纪60年代天文学的四大发现. 为了寻找更多微弱的脉冲星信号, 世界各国的大口径射电望远镜相继投入到这项工作的研究之中, 如美国305 m口径Arecibo望远镜^[1]、澳大利亚64 m口径Parkes望远镜^[1]、德国

1) <https://www.naic.edu>

引用格式: 张海龙, 张萌, 聂俊, 等. 脉冲星数字终端技术综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099503

Zhang H L, Zhang M, Nie J, et al. Pulsar digital backend technologies review (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099503, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0007

100 m口径Effelsberg望远镜^[2]、100×110 m口径GBT望远镜^[3]、中国的500 m口径FAST望远镜^[2]等. 随着脉冲星观测研究的逐渐深入, 截至2018年12月12日, 澳大利亚CASS已编目的脉冲星数量为2659颗^[3], 为脉冲星的进一步研究奠定了坚实基础.

当前射电望远镜系统主要由三大部分组成: 天线系统、接收机系统(模拟前端系统)、数据处理和记录系统(数字终端系统). 终端系统作为射电望远镜的组成部分, 将接收机放大的射电信号作为输入, 功能是实现射电信号的数字化和信号处理, 并将处理后的数据送入存储设备. 当前数字终端已替代模拟终端成为射电望远镜的标准配置, 多功能数字终端系统的硬件平台包括现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)、中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和集成众核(Many Integrated Core, MIC)等. 为了尽可能接收到极其微弱的天体信号, 要求射电望远镜具备更高的灵敏度、分辨率与精确的跟踪能力. 接收机前端系统主要把微弱的天体信号进行放大和频率变换. 数据处理和记录系统主要负责天文数据的高速采样、处理与记录, 当前数字终端系统功能一般都由可编程数字硬件和计算机系统来完成.

脉冲星数字终端系统的功能是对天线接收并放大的脉冲星信号进行数字化处理并生成观测记录文件. 数字技术的高速发展不断提升脉冲星数字终端的性能, 但与此同时实时信号采样对脉冲星观测终端的处理速度和处理能力也提出了更高要求. 根据目前射电天文的科研需要, 未来的发展趋势将是对射频信号直接进行采样量化, 高速宽带数字终端根据不同的观测需求进行信号的实时处理.

当前主流脉冲星数字终端系统由FPGA^[4]、CPU和GPU系统组成, FPGA主要用于ADC控制、数据流控制和信号预处理, 具有高性能浮点运算能力的GPU完成核心算法处理, CPU则用于数据传输、逻辑控制和文件读写^[5]. 这种异构数字终端系统充分发挥了各种计算处理单元的优势, 易于集群扩展, 发展前景广阔,

尤其是FPGA+GPU集群处理模式将是未来脉冲星数字终端系统研制的主攻方向.

模数转换器(ADC, A/D或A-to-D)是一种将模拟信号(如麦克风接收到的声音、射电望远镜接收到的天体辐射信息)转换成数字信号的设备或系统. ADC可以将输入的模拟电压或电流转换为代表电压或电流大小的数字信号, 通常ADC输出是与输入信号成比例的二进制数据.

FPGA, 即现场可编程门阵列. FPGAs包含一系列可编程逻辑块以及可重构互连的层次结构, 这些互连允许块“连接在一起”, 就像许多逻辑门可以以不同的配置相互连接一样. 逻辑块可以配置为执行复杂的组合函数, 或者像AND和XOR这样的简单逻辑门. FPGA可以通过硬件描述语言实现设计, 通过简单的综合与布局, 相应设计可以快速烧录至FPGA上进行测试, 从而实现复杂的逻辑运算、求解数学方程或天文数字信号的实时处理等相关功能. 多块FPGA可以被重新编程来实现不同的逻辑功能, 可通过软件灵活配置, 实现可重构计算. 目前Xilinx的高性能FPGA已被广泛应用于射电天文数字信号处理领域, 其固件主要依靠Matlab中的Simulink模块进行开发和仿真, 再编译成固件对FPGA进行配置.

近年来, 图形处理器GPU因消费领域的旺盛需求而高速发展, 主流GPU的单精度、双精度浮点处理能力和存储器带宽得到了不断提升, Nvidia公司的通用计算设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)^[4]技术包含的并行计算引擎使GPU能够解决更复杂的计算问题, 极大地增强了GPU的通用计算能力. 随着GPU可编程能力、并行处理能力以及应用范围的不断提升和扩展, GPU已发展成为一种高度并行化、多线程、多核的处理器. 目前NVIDIA Tesla P100单精度浮点运算执行速度已经达到10TeraFLOPS^[5]. 利用GPU的并行处理能力, 以CPU和GPU混合加速为特征的异构并行计算系统将成为未来高性能计算的主流, 且在脉冲星信号处理领域将会得到更为广泛的应用.

2) <http://www.cas.cn/zt/kjzt/fast/>

3) <http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/psrcat>

4) <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>

5) <http://www.nvidia.com/object/tesla-p100.html>

2 脉冲星终端发展历史

早期的脉冲星终端设备大部分基于模拟电路, 由于设备性能限制, 采用非相干消色散方式来消除脉冲星信号在星际介质传输过程中的色散问题. 随着微电子和数字技术的快速发展, 为设计和实现带宽更宽、时间和频率分辨率更高、系统稳定性更强的射电天文脉冲星数字终端系统奠定了坚实基础.

观测设备性能的提升使得射电天文可观测天体信号的频率范围从长波扩展到了微波波段, 加快了射电天文学的发展速度. 经过几十年的发展, 主流终端已由模拟信号系统发展为数字信号系统, 处理信号的设备由微波器件进化为数字逻辑电路和高性能计算系统. 射电天文数字观测终端的核心处理器件经历了通用CPU, FPGA, GPU以及混合方式的发展历程. 具备宽带宽、高速信号实时处理能力的数字终端将是未来射电天文仪器发展的必然趋势.

进入21世纪, 澳大利亚、美国、英国和德国等诸多国家都紧跟数字技术的发展趋势, 投入了大量人力、物力和财力, 致力于研制基于软件无线电技术的通用信号处理平台, 并将其应用到射电天文信号处理相关领域, 构建功能完善的天文信号处理系统. 澳大利亚、法国、德国、美国、英国等国家都已在进行基于FPGA和GPU并行的脉冲星消色散系统研制工作, 混合结构脉冲星终端研制已经成为趋势. 其中基于FPGA平台的有澳大利亚CASS (CSIRO Astronomy and Space Science)的PDFB (Pulsar Digital Filter Bank)^[6]系统、欧洲的Uniboard^[6]高性能通用计算平台、德国的XFFTS (eXtended band width Fast Fourier Transform Spectrometer)^[7]系统. 美国NRAO的GUPPI (Green Bank Ultimate Pulsar Processing Instrument)^[8]系统和澳大利亚Parkes的UWL (Ultra-Wide-bandwidth, Low Frequency Receiver)系统采用FPGA+GPU方式实现.

国内在脉冲星终端系统研发方面取得了一系列研究成果. 中国科学院国家天文台、新疆天文台分别从澳大利亚ATNF引进了PDFB系统. 国家天文台、云南天文台利用国内自主研发的VLBI终端在相干消色散

方面开展工作, 并取得了一系列成绩. 上海天文台在DBBC^[9]硬件平台上开发了非相干消色散模块, 成功进行观测并获得了较好的结果. 国家天文台利用计算机集群对相干消色散算法进行了研究. 中国科学院自动化研究所的集成电路设计团队研发了SNAP2平台, 其性能参数比CASPER的ROACH2要高出很多, 目前正在推广应用中. 国家天文台FAST终端团队采用ROACH2平台为FAST 19波束接收系统研制了基于FPGA+GPU的终端系统, 目前已在使用中.

3 主流脉冲星数字终端

3.1 Parkes

Parkes 64 m望远镜, 位于澳大利亚新南威尔士州中西部城镇Parkes, 由CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization)运营, 是CASS的一部分. 自1961年运行以来, 由于望远镜接收系统一直处于不断的升级改造中, 至今Parkes仍然是世界领先的射电望远镜之一^[7].

脉冲星是Parkes望远镜的一个主要研究领域, 在与其他天文台和大学的合作下, 脉冲星终端系统不断更新换代, 提高了性能和分辨率. Parkes主要使用的脉冲星数字终端系统有DFB, CASPSR, BPSR, UWL等^[10].

3.1.1 DFB

DFB (Digital Filter Bank)是由澳大利亚CASS开发的基于FPGA的脉冲星终端系统, 处理带宽为1 GHz, 被设计用于高时间分辨率毫秒脉冲星计时观测, 可满足高带宽、高精度计时和偏振观测所需高时间分辨率要求. DFB系统具有多种观测模式, 能够实现数据采集、RFI抑制、多相滤波、消色散和折叠等处理. DFB4在带宽不超过1 GHz的情况下可实现8位采样精度, 具有较高的动态范围. DFB4可选用带宽为8, 64, 128, 512 MHz, 最高可达1 GHz, 通道数划分取决于观测模式、带宽和配置, 最大通道数量可达8192^[8].

DFB提供了脉冲星折叠及搜寻模式, 其存储的比

6) <http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/observing/DFB.pdf>

7) <http://www.parkes.atnf.csiro.au/>

8) <http://www.parkes.atnf.csiro.au/observing/documentation/software/CORREL/correl.html>

特数、带宽、极化和采样精度等可以配置, 折叠模式和搜寻模式的数据格式为Fits. DFB提供频谱仪模式, 可完成在低时间分辨率下的谱线或连续谱观测, 作为谱线观测的标准光谱仪使用. DFB还具有基带输出模式, 可为其他实时相干消色散系统提供数字化基带数据.

DFB系统整体架构如图1所示, 硬件模块包括DFB机箱和背板、48伏电源模块、采样器和合成器模块、RTM模块、数字滤波器组模块、通信模块. ADC将输入到DFB中的模拟信号转换为数字格式. DFB核心数字滤波器组模块的DSP板, 由多块FPGA组成, 每个FPGA都包含一个大小从512通道到8192通道不等的滤波器组. 通信模块负责缓冲来自DSP的10 Gb以太网数据, 并提供系统时钟信号.

DFB系统具备两路极化信号的处理能力, 模拟中频信号首先经过ADC转换成数字信号, 经过ADC串并转换模块(Rear Transition Module, RTM)将高速串行数字比特流转换成低速并行数据, 然后送入数字信号处

理模块(Digital Signal Processing, DSP)进行处理. 经过处理的脉冲星数据将通过两个万兆以太网口传输到下一级处理单元^[11].

DFB软件系统包括调试软件和相关器软件两个部分. Xilinx工具包用于对DSP卡上的FPGA进行编程, FPGA控制DSP的信号处理功能和整个系统的计时. DFB可以实现的操作模式有脉冲星折叠、搜寻模式、频谱仪模式⁹⁾.

3.1.2 BPSR

BPSR (Berkeley Parkes Swinburne Recorder)是Parkes的高分辨率数据采集和处理设备, 带宽为400 MHz, 与Parkes的13波束接收机配合使用, 主要用于脉冲星搜寻和瞬态检测^[12]. 与模拟脉冲星终端相比, BPSR有更高的时间分辨率、频率分辨率及更大的动态范围, 其时间分辨率为32 μ s, 能够提供8位1024通道的数据.

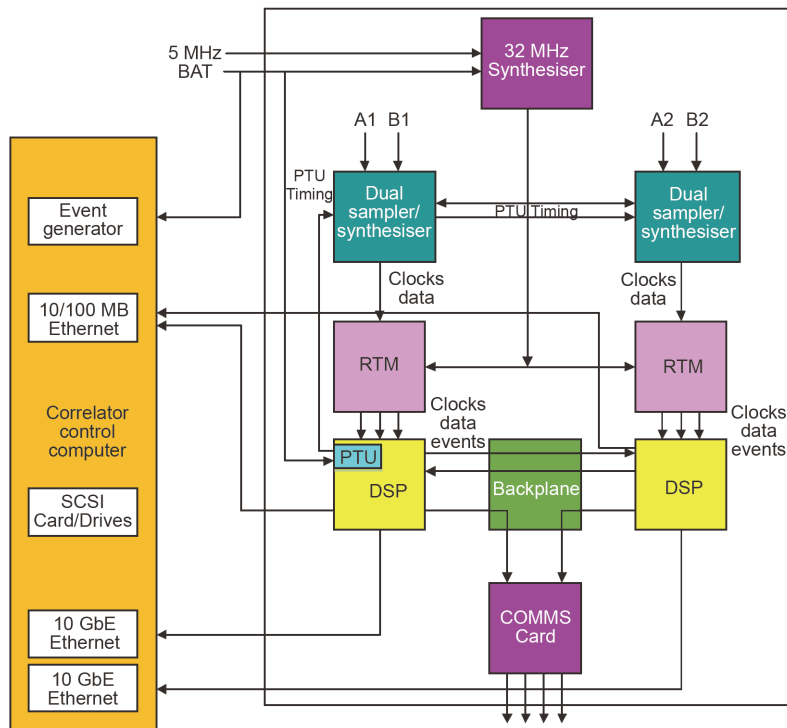


图 1 (网络版彩图) DFB体系结构框架图(<http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/observing/DFB.pdf>)

Figure 1 (Color online) The block diagram of DFB (<http://www.jb.man.ac.uk/pulsar/observing/DFB.pdf>).

9) https://www.parkes.atnf.csiro.au/people/sar049/papers/JMS_52.pdf

BPSR系统首先由ROACH对两路双极化信号进行模数转换, 每路信号的带宽为400 MHz, 这些信号通过一个多相滤波器组被细分为1024个频率通道, 通道带宽为390 KHz, 多通道数据将被传输到8个计算节点进行数据处理, 每个GPU节点通过10 GbE CX4接口直接连接到ROACH. GPU计算服务器将处理后数据写入磁盘阵列. BPSR终端系统框架如图2所示¹⁰⁾.

BPSR的硬件系统由13块ROACH、1台20 Gbps InfiniBand switch、8台计算节点(包含16块Tesla GPU)、2套48 TB RAID磁盘阵列组成. 每块ROACH接有2个ADC和2个在FPGA上实现的多相滤波器组, FPGA实现的多相滤波器组将双极化400 MHz带宽信号划分为1024个频率通道; 采样频率64 μ s, 2 bits采样精度, 将数据封装成UDP包, 通过10 GbE CX4网络直接传输到GPU计算服务器中进行数据处理. 每个服务器都有足够的磁盘空间缓存约3天的数据, 数据记录后将通过专用1 Gb/s光纤传输备份到Swinburne大学.

BPSR应用Swinburne与世界各地脉冲星研究团组合作开发的开源软件PSRDADA与DSPSR处理脉冲星数据. 数据通过PSRDADA进行路由、管理、监控, 使用DSPSR处理后写入存储. BPSR主要用于Parkes高时间分辨率巡天(HTRU Survey)和脉冲星、河外射电脉冲搜寻(SUPERB).

3.1.3 CASPSR

CASPSR (CASPER Parkes Swinburne Recorder)为400 MHz带宽的基带信号处理设备, 使用4个工作站实

现数据处理, 每个工作站配有2个NVIDIA Tesla GPU, 可实现实时相干消色散, 主要用于折叠观测模式. 硬件系统由一块IBOB (CASPER FPGA平台); 1台Cisco SFS 7000 InfiniBand交换机; 2台服务器节点, 每个服务器节点具有48 GB的RAM; 4台GPU计算节点, 其中每个计算节点由2颗四核Intel Xeon E5520处理器, 24 GB RAM, 2块4 GB内存的NVIDIA Tesla C1060 GPU; 以及2套48 T的存储组成.

其中IBOB对两路双极化信号进行模数转换(IBOB将模拟信号转换为800 MSps数字信号), 每个信号的最大带宽为400 MHz, 这些信号通过2块10 GbE网卡传输到20 Gbps交换机, 从而为4个GPU计算节点提供持续的数据流. 如果执行基带数据记录模式, 则将未处理的数据直接写入RAID; 非基带模式时, 将先进行实时相干消色散、折叠等操作. CASPSR的系统框架如图3所示.

数据进入GPU数据处理服务器后先缓存在内存中, 再利用开源软件PSRDADA实现数据缓冲区, 分块发送给GPU进行处理; 使用DSPSR实现实时相干消色散和RFI处理; 最终将处理后数据存档供以后使用PSRCHIVE进行后处理. CASPSR通过直接在内存中处理数据, 大大降低了磁盘I/O次数, 利用每个工作站上的多GPU实现了多线程数据处理, 提高了数据实时处理效率.

3.1.4 UWL

Parkes超宽带低频接收机(The Ultra-Wide-band-

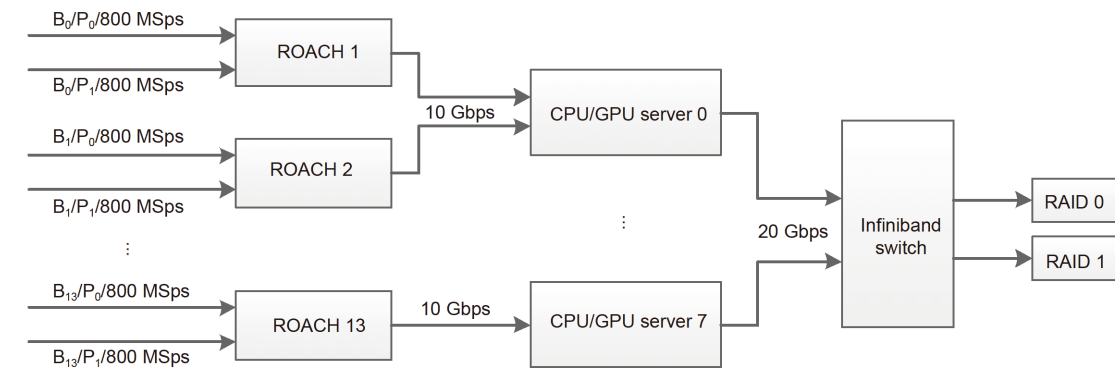


图2 BPSR终端系统框架

Figure 2 The block diagram of BPSR.

10) <http://qtt.xao.cas.cn/qttzyda/qttsl/201705/P020170517700094201582.pptx>

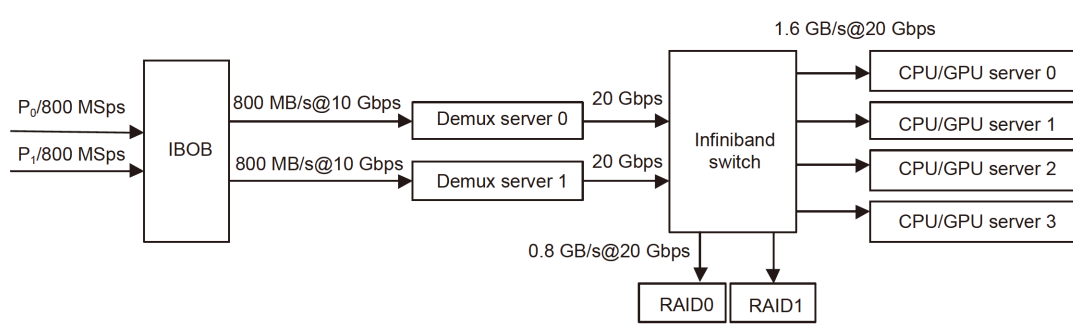


图 3 CASPSR系统框架

Figure 3 The Block Diagram of CASPSR.

width, Low Frequency Receiver, UWL)覆盖0.7到4.0 GHz的带宽, UWL是一台多功能数字接收设备, 它的数字终端系统可实现多种观测模式. UWL信号经过数字化后, 由多块FPGA卡进行数据通道划分, 多通道数据最终由GPU集群实现实时数据处理¹¹⁾¹²⁾. UWL拟在脉冲星研究方面取得更高影响力的科学成果, 相比于非宽带接收机可提高脉冲星信号的信噪比, 从而提高测量脉冲星到达时间的精度; 将显著提高Parkes脉冲星计时阵列(PPTA)项目的观测效率, 所有的脉冲星计时项目都将受益于超宽带系统的高灵敏度和宽频带, 如脉冲发射机制研究、间歇脉冲星、法拉第旋转, 同时也可研究更多谱线, 发现新的脉冲星和瞬变源等. 此外, 超宽带的同步频率覆盖将大大改善DM的校正, 还可以研究射频干扰消除方法和校准程序. UWL接收机覆盖整个ASKAP波段, 为ASKAP后续研究提供了高灵敏度的实时干涉仪.

UWL安装在Parkes主焦点上(Focus Cabin)、位于Marsfield, Canberra及世界各地的观测者可通过网络实现远程观测与控制, 观测后数据将通过专线传输到位于Canberra的数据存储中心, 由于UWL产生的数据量较大, 通过在Canberra的高性能计算系统实现数据处理是未来发展的趋势.

UWL的终端部分框架如图4所示, UWL接收两个偏振和一个参考信号, 由一个三路复用器将每个信号分到三个带通滤波器, 产生三个射频波段, 将这些信号共传递给9个ADC. 在Parkes观测塔中, 将来自主焦点的数字化信号通过8块FPGA进行信号处理, 8块

FPGA将整个接收机带宽分为26个频率通道, 每个通道带宽为128 MHz. 由64个QSFP 40 Gb/s端口交换设备实现所有UWL设备的互连, 多通道数据将传输到Medusa集群进行数据的实时处理. Medusa集群由9台计算服务器组成, 每个服务器有4块GPU和多个网络接口, 用于多个通道数据输入和数据处理.

通过网络传过来的实时数据将先进入计算服务器内存形成环形缓冲区, 环形缓冲区中数据分块送往GPU, 针对不同观测模式实时处理数据. 由Medusa集群生成的26个通道的数据将被传输到Euryale存储与计算服务器进行元数据合成, 形成最终归档数据. Euryale将实现数据日志记录、监控、元数据合成、管理、数据分发、控制等多个功能. 数据最终从Euryale通过专线根据数据类别分发到CSIRO的Marsfield, Canberra, Melbourne等数据中心进行长时存储. 天文学家可从ATOA与CSIRO DAP在线检索Parkes观测数据, 并使用位于各数据中心的高性能计算系统处理数据.

3.2 GBT

GBT即Green Bank Telescope, 中文名为格林班克望远镜, 坐落于美国西弗吉尼亚州, 是目前世界上最大的全可动射电望远镜. 在2016年9月30日之前, 它一直由美国国立射电天文台运行, 自2016年10月1日起, 由新成立的格林班克天文台接管运行. GBT的无阻塞孔径和良好的表面精度, 可在0.1–116 GHz全工作范围内提供卓越的灵敏度, 可以访问整个当地天区的85%. GBT的高灵敏度使其成为ALMA, VLA和其他高分辨

11) http://www.atnf.csiro.au/observers/memos/Parkes_UWL_proposal.pdf

12) http://www.atnf.csiro.au/management/atuc/2013dec/science_meeting/UWL_ATUC.pdf

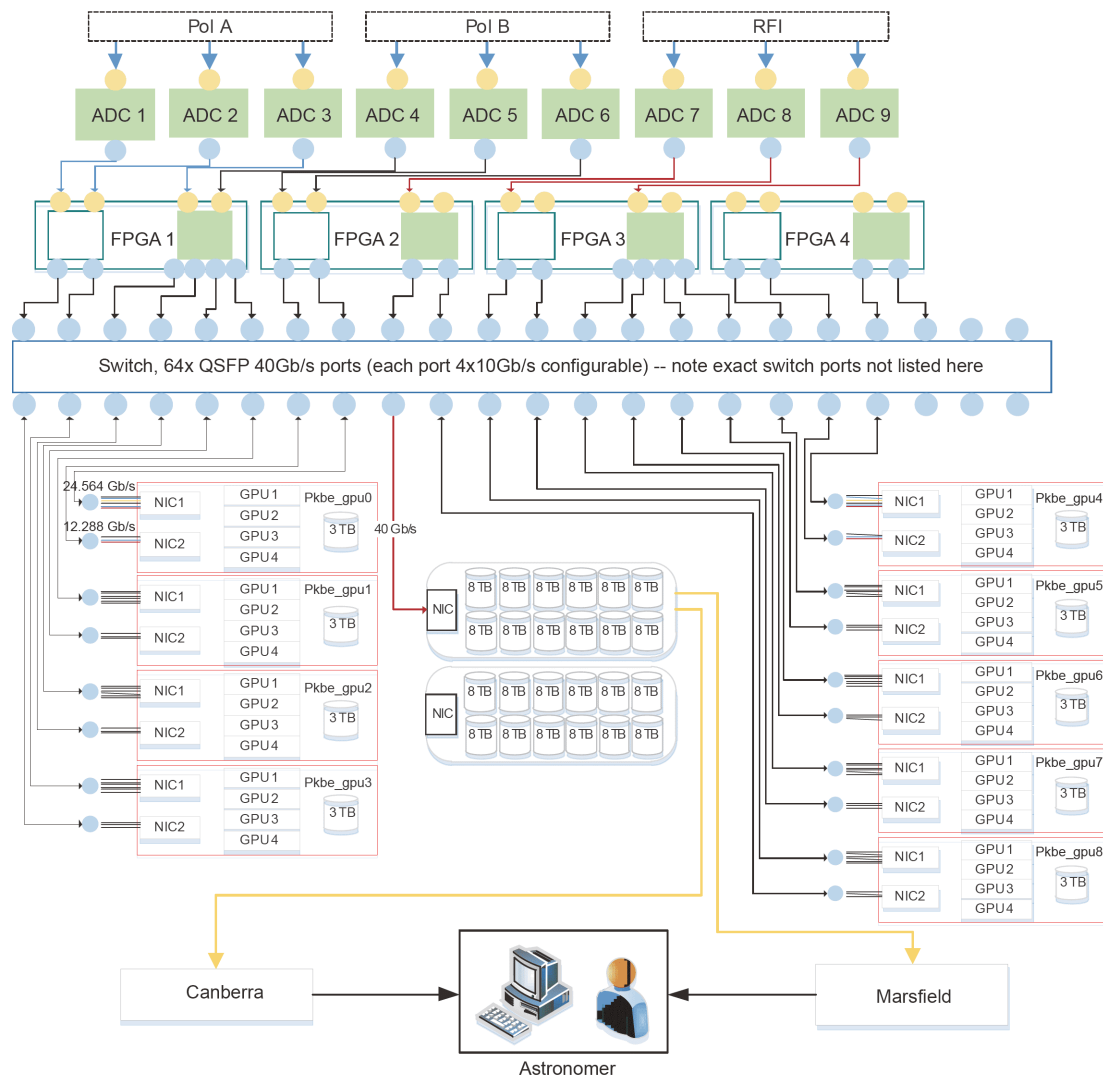


图 4 (网络版彩图)Parkes UWL终端框架示意

Figure 4 (Color online) The block diagram of Parkes UWL.

率阵列的必要补充¹³⁾.

3.2.1 GUPPI

GUPPI (Green Bank Ultimate Pulsar Processing Instrument)是GBT曾使用过的数字信号处理设备, 被设计用于Green Bank 43 m (140 ft)望远镜和GBT进行脉冲星研究. 美国国立射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)一直在使用FPGA平台和

其他由CASPER设计的工具开发GUPPI¹⁴⁾, 使其满足天文观测研究的需要.

GUPPI的开发包括三个不同的阶段. 第一阶段: 使用非相干滤波器组和全斯托克斯提供标准脉冲星观测能力. 第二阶段: 提供宽带宽(200–800 MHz)相干消色散观测模式. 第三阶段: 完全集成到GBT监视和控制(M&C)系统中, 成为通用观测后端.

GUPPI的设计目标是创建一个具有高动态范围

13) <https://public.nrao.edu/telescopes/gbt/>

14) <https://safe.nrao.edu/wiki/pub/Software/CicadaSoftwareStatus/SPIE08-GUPPI-preprint.pdf>

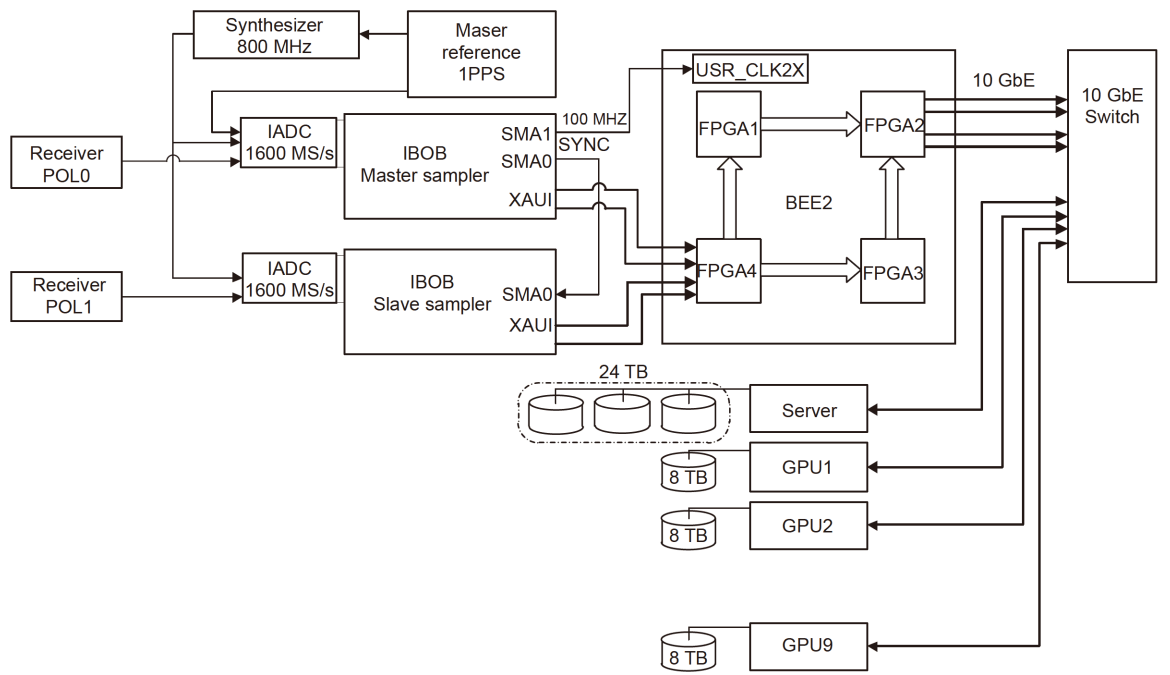


图 5 GUPPI/WUPPI工作框图

Figure 5 The block diagram of GUPPI/WUPPI.

(至少8位采样)、大带宽(800–1000MHz)、全极化能力、更好的抗射频干扰(RFI)以及高频率分辨率的脉冲星后端,使其能够得到具有高动态范围和对RFI有着良好抑制的全极化观测数据,从而得到高质量、高信噪比的单个脉冲信息.

GUPPI的核心数据采集程序由C源代码组成,并包含Python接口,用于控制和简单数据检查,数据采集软件子系统负责接收10 GbE数据流,并做进一步处理, GUPPI输出PSRFITS格式脉冲星数据. 其运行原理如图5所示,接收机的两路极化数据经IADC采样并由IBOB处理后传输至BEE2,数据处理服务器通过10GbE交换机连接到BEE2以进行数据传输和处理¹⁵⁾. 主服务器负责运行GUPPI的所有软件,监测数据处理及记录情况,并为GUPPI的板卡提供物理控制接口.

GUPPI于2008年4月17日首次使用,对于脉冲星B1824-24 (J1824-2452A或M28A)所取得的观测结果

是GBT之前脉冲星仪器时间分辨率的两倍,取得了较好的观测结果. 根据Green Bank Observatory的官方网站显示, GUPPI已经在2018年2月1日停止使用¹⁶⁾.

3.2.2 VEGAS

VEGAS是GBT使用的下一代脉冲星观测仪器, GUPPI和VEGAS均为包含脉冲星观测模式的多功能终端, VEGAS在硬件平台和性能指标上更为先进. VEGAS扩展了GUPPI功能并提升了性能,用以满足7波束Ku波段焦平面阵列接收机所需的更高带宽和光谱分辨率. NRAO网站给出了VEGAS的详细描述和它的科学目标¹⁷⁾.

如图6所示, VEGAS基本系统由ADC, ROACH系列FPGA平台、交换设备与GPU处理集群组成. ADC采样后的宽带信号经过多台ROACH进行频率通道划分后将数据传输至交换设备,然后再由交换设备传输至GPU集群进行下一步数据处理.

15) https://casper.berkeley.edu/wiki/images/7/72/Workshop_casper2010_green_bank_john_ford.pdf

16) <https://greenbankobservatory.org/gbt-observers/proposals/past-proposal-calls/2017b-call-for-proposal>

17) <http://www.gb.nrao.edu/vegas/report/>

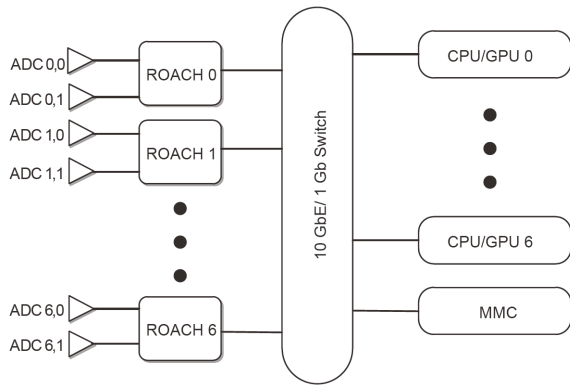


图 6 VEGAS系统框架(<http://www.gb.nrao.edu/vegas/report/>)
Figure 6 The Block Diagram of VEGAS (<http://www.gb.nrao.edu/vegas/report/>).

3.3 Effelsberg

Effelsberg射电望远镜于1972年8月1日落成, 位于德国波恩市西南方向约40 km的山谷中. 它的100 m天线由2372块金属板排列成17个同心圆环构成, 总质量达3200 t. Effelsberg主要使用的脉冲星终端设备有EBPP及PSRIX^[13].

PSRIX后端是2011年后Effelsberg 100 m射电望远镜主要的脉冲星观测设备. 基于ROACH系统构建, 系统可实现500 MHz的带宽观测, 比其前身Effelsberg-

Berkeley脉冲星后端(EBPP)所能记录的带宽显著增加, 通过PSRIX数据与EBPP数据的比较, 其性能得到了大幅提升, 脉冲到达时间(TOA)精度提高2–5倍. PSRIX基于CASPER的ROACH系列平台实现, 其实现原理与所具备功能与GUPPI相似.

3.4 Tianma

上海65 m射电望远镜(Tianma)坐落于上海松江佘山, 是65 m口径全方位可动的大型射电天文望远镜. 天马望远镜成功开展了谱线、脉冲星和VLBI射电天文观测.

DIBAS (Digital Backend System)¹⁸⁾是安装于上海天文台天马望远镜的脉冲星和谱线观测终端, 整个设备包括数据采集、数据处理、存储和观测控制四部分. 脉冲星观测具备相干消色散和非相干消色散两种模式.

DIBAS硬件主要由数据采集系统、高性能计算系统(HPC)和存储器系统组成. 系统整体工作原理如图7所示, 接收机采集的信号经ADC采样后交由CASPER的Roach2平台进行频率通道划分, 多通道数据经高速交换设备传输到各GPU计算节点进行数据处理, 处理后数据写入存储, 观测时可根据需要对Roach2系统进行配置.

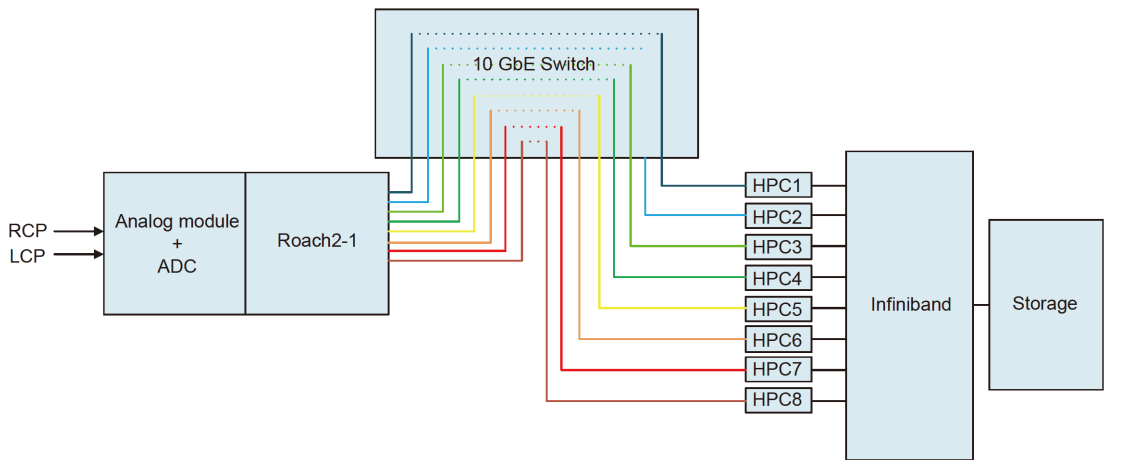


图 7 (网络版彩图) DIBAS系统框架(<http://radio.shao.cas.cn/kyzb/sdtwgcjd/dibas/>)
Figure 7 (Color online) The block diagram of DIBAS (<http://radio.shao.cas.cn/kyzb/sdtwgcjd/dibas/>).

18) <http://radio.shao.cas.cn/kyzb/sdtwgcjd/dibas/>

3.5 Arecibo

坐落于美国波多黎各的阿雷西博射电望远镜 (Arecibo Radio Telescope), 是美国NAIC (National Astronomy and Ionosphere Center)的观测设备, 其直径达305 m, 于1963年建成并投入使用, 2016年中国FAST建成之前阿雷西博望远镜一直是世界上最大的单口径射电望远镜. Arecibo主要用于射电天文学、大气科学、雷达天文学三类科学研究.

3.5.1 WAPP

WAPP (Wideband Arecibo Pulsar Processor)是阿雷西博天文台的脉冲星终端设备, 主要用于脉冲星和谱线观测, 其设计如图8所示, 在2000年开始投入使用. WAPP有两个中频(Intermediate frequency, IF)信道、两个相关器、一个多路器, 能完成自相关与互相关^[19], WAPP可用于进行非相干消色散脉冲星观测^[14]. WAPP的中频通道频率为100 MHz, 这些通道被设计为双极化观测使用, 也可以测量单频带或双频带的自相关, 还能够测量互相关产生的stokes参数. WAPP的两个中频信道通常被用于测量来自一个接收机的正交极化. 通过改变WAPP的配置来测量单个中频、两个中频的斯托克斯变量的功率谱.

WAPP具有100与50 MHz两种带宽模式, 完整的正交偏振测量, 单脉冲搜寻模式. WAPP有3级或9级采样模式. 通常3级采样自相关有256个延迟, 每64 μs 累计一次, 数据在极化求和后写入磁盘阵列^[15].

阿雷西博的巡天项目ALFA (Arecibo L-band Feed Array)^[16]、银河盘片巡天PALFA (Pulsar-AFLA)^[17]、ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA)^[20]均使用4个WAPP组合作为后端处理设备.

3.5.2 PUPPI

PUPPI (The Puerto Rico Ultimate Pulsar Processing Instrument)是阿雷西博天文台使用的脉冲星终端设备, PUPPI是GUPPI(GBT研制的脉冲星终端设备)的克隆版, 主要用于单波束脉冲星观测.

PUPPI硬件包括IF调节器、时钟合成器、ADC, IBOB, BEE2. 单块CASPER FPGA平台包含5个FPGA. BEE2从IBOB读取采样数据, 并使用数字(多相)滤波器组将其分割成频率通道. 在某些模式下, 频谱被检测并积累在FPGA中, 而在另一些模式下, 信道化电压数据被直接输出, 输出采用4条万兆以太网到PUPPI 10 GbE交换设备. PUPPI有非相干与相干消色散两种模式, 其实现原理与GBT的GUPPI相似.

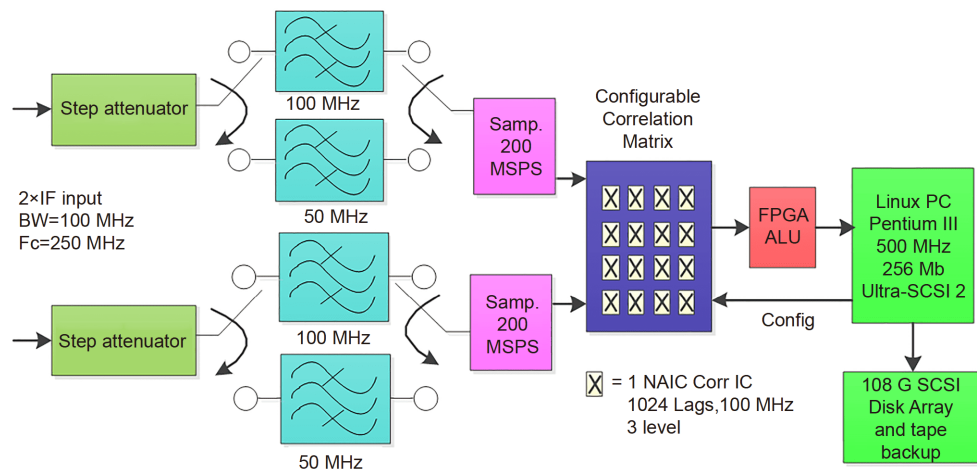


图 8 (网络版彩图) WAPP脉冲星处理模块 (https://casper.berkeley.edu/wiki/images/d/dd/Workshop_casper2010_arecibo_instrumentation_luis_quintero.pdf)

Figure 8 (Color online) The pulsar processing module of WAPP (https://casper.berkeley.edu/wiki/images/d/dd/Workshop_casper2010_arecibo_instrumentation_luis_quintero.pdf).

19) https://casper.berkeley.edu/wiki/images/d/dd/Workshop_casper2010_arecibo_instrumentation_luis_quintero.pdf

20) <http://egg.astro.cornell.edu/alfalfa/index.php>

3.6 FAST

500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope), 简称为FAST, 被誉为“中国天眼”, 位于贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇大窝凼的喀斯特洼坑中. FAST是目前世界上最大的单口径射电望远镜, 于2016年建成. FAST的首要目标是寻找脉冲星, 截至2018年9月12日, FAST在调试阶段已发现44颗新脉冲星.

FAST数字终端基于ROACH2设计, 脉冲星搜寻和谱线观测采用GPU集群处理方案. FAST的接收机与终端系统覆盖频率70 MHz–3 GHz, 有多套接收机和终端设备. 其中主要设备是一套1050–1450 MHz用于中性氢、脉冲星巡天等的双偏振19波束L-波段馈源接收机, 馈源接收来自主反射面汇聚的电磁波, 经过适当处理得到的信号经过光纤传输到数据处理终端^[18].

FAST数字终端采用ROACH2平台. 数字终端频率通道数范围在1024–8192, 时间分辨率(积分时间)范围在0.05–1 ms, 采样时间为50或100 μ s, 动态范围2, 4, 8 bits, 19波束接收机以8 bits采样的基带数据量为38 GB/s, PSRFITS格式数据量为3040 MB/s (4 k通道, 50 μ s, 8 bits). FAST观测M31, M33, 球状星团, 漂移扫描等早期科学目标使用的是270–1620 MHz宽带接收

机, 接收机有两个子带, 8 bits采样的数据量为7.2 GB/s, PSRFITS格式数据量为320 MB/s (4k通道, 50 μ s, 8 bits).

如图9所示, FAST数字终端采用FPGA, GPU与高速网络相结合的架构, 由FPGA (ROACH2)完成高速流数据处理, GPU负责信号处理, 高速网络用来数据传输用一套硬件设备, 通过软件和FPGA固件的重新配置实现了宽带频谱、窄带精细频谱、脉冲星搜寻和计时等不同观测需求的数字终端.

4 QTT终端设计方案

通过分析国内外主流射电观测设备终端的历史和现状, 并结合QTT接收系统的实际需要, QTT^[19]可采用FPGA与GPU混合模式的脉冲星数字终端模式, 实现射电信号实时高精度采样, 基于GPU的消色散、RFI抑制、脉冲星和暂现源实时搜寻、VLBI及谱线观测等多功能为一体的终端系统. 基于FPGA, GPU等器件的终端系统可以通过不同配置实现多种观测模式, 这种异构终端系统充分发挥各种计算处理单元的优势, 易于集群扩展. QTT多功能终端系统总体框架如图10所示.

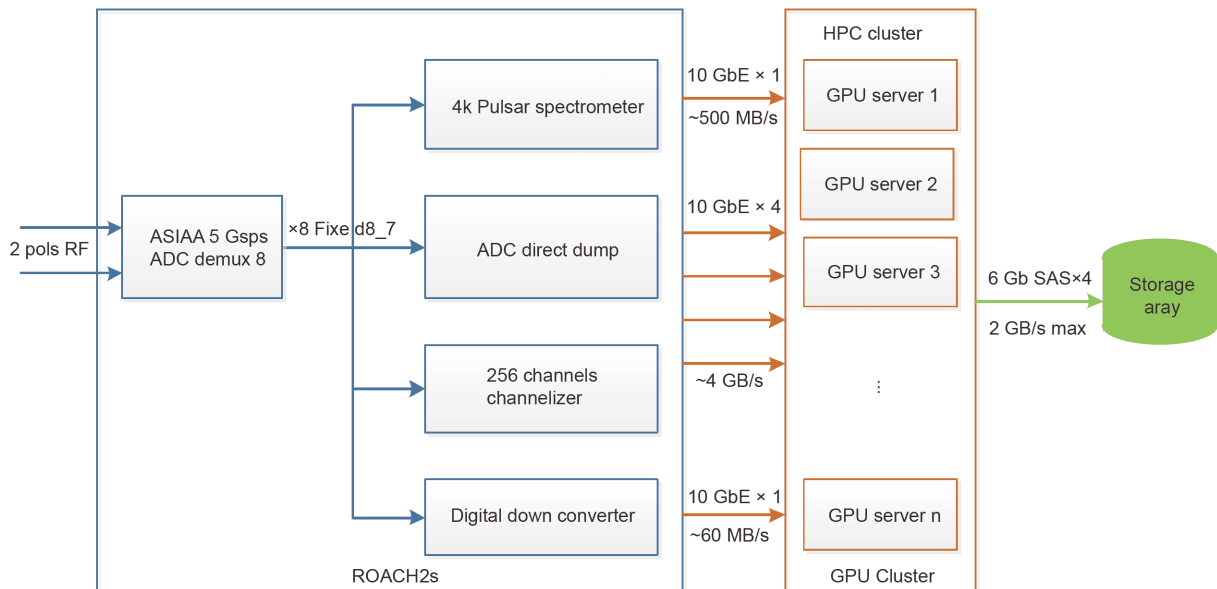


图 9 (网络版彩图) FAST终端硬件框图

Figure 9 (Color online) The block diagram of FAST backend.

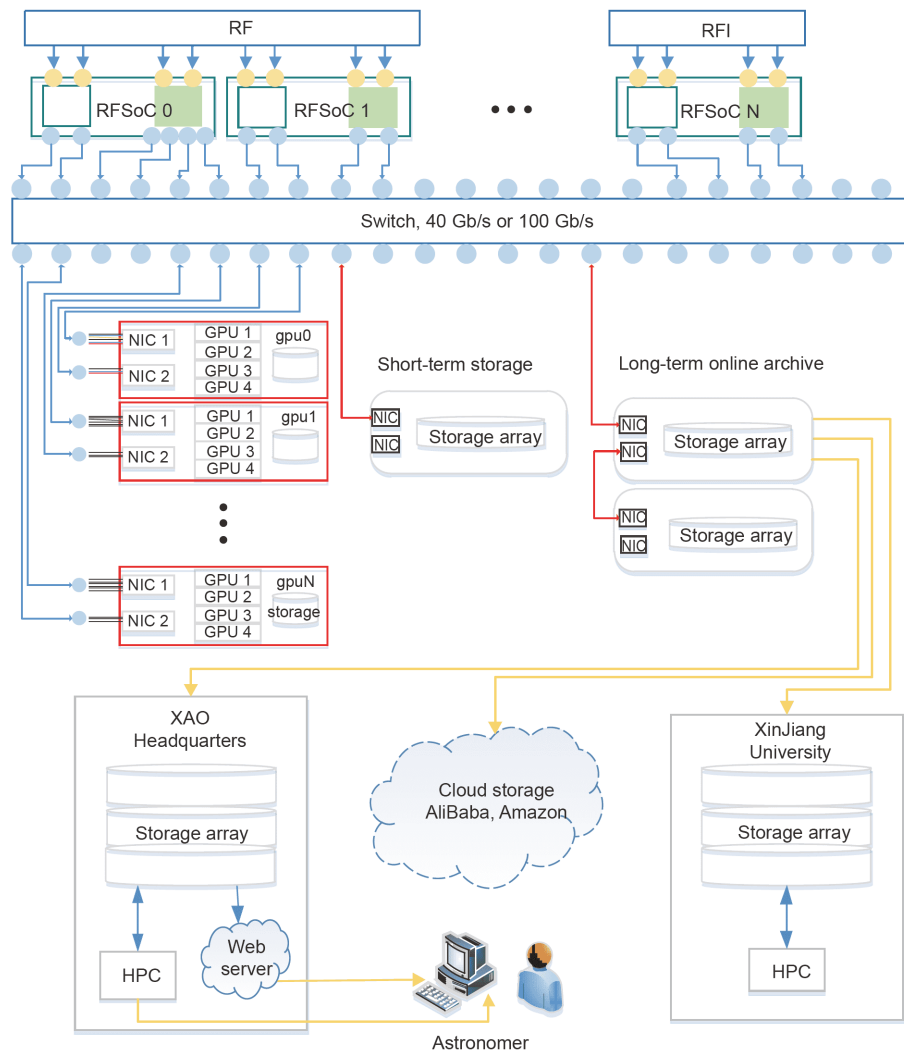


图 10 (网络版彩图) QTT终端系统框架

Figure 10 (Color online) The block diagram of QTT backend system.

数字终端信号采集与预处理模块计划采用Xilinx推出的可编程RFSoc^[20]器件, 减少脉冲星终端系统的功耗和成本, RFSoc器件将模数转换器、ARM处理器以及FPGA架构整合到单芯片器件中, 在集成度方面取得了重大突破. Zynq UltraScale+RFSoc^[21]直接将ADC, FPGA, ARM完美集成在一起, 从而为高性能应用提供完整的RF信号链. 单芯片上模拟和数字功能的集成, 实现了跨越整个信号链的可重复配置功能, 降低了功耗和封装尺寸且简化了设计流程.

经过RFSoc预处理后的多通道数据被送给GPU集群进行数据后处理, 多台GPU服务器处理后的多通道

数据将汇聚到Short-term Storage中进行元数据整合与数据合并, 最终形成归档数据, 通过高速网络将观测数据存储在Long-term Online Archive中, 进行长期保存. 所有Long-term Online Archive中数据将通过数据专线备份到新疆天文台本部(XAO Headquarters), 同时实现数据发布. 将来可能会与高校合作(新疆大学)或将数据存储到云平台(AliBaba, Amazon). 由于观测产生的数据量过大, 不再适合将数据下载到本地进行处理, 未来的趋势是依靠距离数据最近的高性能计算系统来解决海量天文数据的处理问题.

QTT多功能数字终端将具备脉冲星、暂现源、分

子谱线、总功率、VLBI及基带数据等多种模式. 终端系统实现对RF信号进行采样, 采用RFSoc芯片将很大程度上减少QTT数字终端功耗、设计周期, 并提高终端系统集成度. 脉冲星模式是QTT多功能数字终端重要的观测模式之一, 主要用于脉冲星搜寻和脉冲星到达时间观测. FPGA实现数据采集、粗糙通道划分、RFI处理和数据包发送等功能, GPU完成消色散等核心算法处理.

QTT数字终端系统硬件开发成本高、周期长、难度较大, 选择满足需求、灵活、稳定、易维护升级的设计方案是多功能数字终端系统研制的关键.

5 总结

随着脉冲星研究的不断深入, 各天文研究台站均在更宽带宽、更高时间分辨率和更高频率分辨率数字终端技术方面完成了大量的研究与技术工作. 文章综述了主要天文台站所使用或正在研制的脉冲星数字终端系统, 讨论了各种信号处理硬件平台的特性与发展趋势, 分析了国际前沿射电望远镜脉冲星数字终端系统的性能指标, 综合现有脉冲星数字终端特点给出了以RFSoc和GPU信号处理核心算法为研究重点的QTT多功能数字终端研发建议.

参考文献

- 1 Bailes M. Precision timing at the Parkes 64-m radio telescope. In: Radio Pulsars, ASP Conference Proceedings. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2003. 57–60
- 2 Hachenberg O, Grahl B H, Wielebinski R. The 100-meter radio telescope at Effelsberg. *Proc IEEE*, 1973, 61: 1288–1295
- 3 Srikanth S, Norrod R, King L, et al. An overview of the Green Bank Telescope. *Proc Anten Propag Soc Intern Symp*, 1999, 16: 1548–1551
- 4 Leong P H W. Recent trends in FPGA architectures and applications. *Electron Design, Test Appl*, 2008, 137–141
- 5 Pellerin D, Thibault S. Practical FPGA Programming In C. New Jersey: Prentice Hall Press, 2005
- 6 Hargreaves J E. UniBoard: Generic hardware for radio astronomy signal processing. Amsterdam: Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8452: 84522
- 7 Klein B, Krämer I, Hochgürtel S, et al. The next generation of fast Fourier transform spectrometer. In: 19th International Symposium on Space Terahertz Technology 2008. Groningen: International Symposium on Space Terahertz Technology, 2008
- 8 Ransom S M, Demorest P, Ford J, et al. GUPPI: Green Bank Ultimate Pulsar Processing Instrument. Pasadena: American Astronomical Society Meeting, 2009. 214
- 9 Li Z X, Wang M, Hao L F. Observations of pulsars with a record system combining a DBBC and a Mark 5B (in Chinese). *Astron Res Techno*, 2011, 8: 1–7 [李志玄, 汪敏, 郝龙飞, 等. 基于DBBC+Mark 5B记录系统的脉冲星观测. *天文研究与技术*, 2011, 8: 1–7]
- 10 Sarkissian J M, Carretti E, van Straten W. The parkes pulsar backends. *AIP Conf Proc*, 2011, 1357: 351–352
- 11 Ng C W Y. Pulsar Searching and Timing with the Parkes Telescope. Dissertation for Doctoral Degree. Bonn: Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 2014
- 12 Keith M J, Jameson A, van Straten W, et al. The high time resolution universe pulsar survey-I. System configuration and initial discoveries. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 409: 619–627, arXiv: 1006.5744
- 13 Lazarus P, Karuppusamy R, Graikou E, et al. Prospects for high-precision pulsar timing with the new Effelsberg PSRIX backend. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 458: 868–880, arXiv: 1601.06194
- 14 Dowd A, Sisk W, Hagen J. WAPP—Wideband Arecibo Pulsar Processor. Bonn: International Astronomical Union Colloquium, 2000. 177: 275–276
- 15 Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. A 1.4 GHz arecibo survey for pulsars in globular clusters. *Astrophys J*, 2007, 670: 363–378, arXiv: 0707.1602
- 16 Leeuwen J, Cordes J M, Lorimer D R, et al. Arecibo and the ALFA pulsar survey. *Chin J Astron Astrophys*, 2006, 6: 311–318
- 17 Deneva J S. Pulsar Surveys Present and Future: The Arecibo Pulsar-ALFA Survey and Projected SKA Survey. Germany: Physikzentrum Bad Honnef, 2006. 52–55
- 18 Nan R D, Li H X. Progress of FAST in science, technique and instrument (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1063–1074 [南仁东, 李会贤. FAST的进展——科学、技术与设备. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44: 1063–1074]

- 19 Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110 m射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- 20 Farley B, McGrath J, Erdmann C. An all-programmable 16-nm RFSoc for digital-RF communications. *IEEE Micro*, 2018, 38: 61–71
- 21 Finnerty A, Lee M. Integrated SD-FEC in Zynq UltraScale+RFSocs for higher Throughput and Power Efficiency. WP498 (v1.1). Carrollton: Xilinx Inc., 2018

Pulsar digital backend technologies review

ZHANG HaiLong^{1,2*}, ZHANG Meng^{1,3}, NIE Jun^{1,2}, Tohtonur^{1,3}, ZHU Yan^{1,3},
WANG BoQun^{1,3}, WANG WanQiong¹, WANG Jie¹, YE XinChen¹, LI Jia¹,
PEI Xin¹, LI Jian¹, WANG Na^{1,2}, JIANG Peng⁴ & ZHU Yan⁴

¹ Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

² Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Pulsar digital backend is a key equipment for pulsar timing and searching observation, which digitizes the analog signal and processes the pulsar signal. The lucubration of pulsar research and rapid development of digital technology gradually leads to higher performance requirements of pulsar digital backend, such as faster sampling and real time processing along with wider bandwidth, higher time and frequency resolution. Based on main pulsar observation large aperture radio telescopes over the world, this paper reviews the development history and the current status of pulsar backends. After investigating and analyzing the existed and on developing pulsar digital backends, this paper conceives and discusses design scheme and development idea of QTT pulsar backend with RFSoc platform and GPU cluster system.

pulsar, digital backend, radio astronomy, RFSoc, GPU

PACS: 47.27.-i, 47.27.Eq, 47.27.Nz, 47.40.Ki, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0007](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0007)