

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.12

新疆 110 m 射电望远镜终端规划及 预先研究

裴 鑫, 聂 俊, 李 健, 陈卯蒸

(中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 对拟建的 110 m 口径全可动射电望远镜的终端系统进行了考虑和规划, 根据其观测课题详细分析了终端配备在功能、性能、系统匹配等方面的需求, 结合未来射电天文终端发展趋势, 合理划分为模拟连续谱终端和通用数字终端两部分。对连续谱终端方案进行了简要的讨论和考虑, 对通用数字终端的研制难点进行了详细的分析, 最后对前期的预先研究工作进行了简单的介绍。

关 键 词: 射电天文; 天文终端; 混合架构; 图形处理单元

中图分类号: P111.44 **文献标识码:** A

1 引 言

110 m 口径全可动射电望远镜拟建于新疆奇台, 也称奇台射电望远镜 (QiTai radio Telescope, 简称 QTT)^[1]。QTT 的目标是依托世界一流天文台址建设 110 m 世界最大口径、全向可动、高灵敏度、多学科目标、世界领先的通用型射电望远镜; 支撑我国天文学前沿突破、跨越发展, 并进入世界前列; 继而建成综合开放的国家级射电天文观测基地和新的世界级射电天文研究中心, 为我国和世界天文学创新发展做出贡献。

天文终端经历了模拟终端到数字终端的发展, 得益于现代高速模数转换器制造、数字信号处理和计算机科学等技术的发展, 天文学早已进入数字化时代。与模拟信号相比, 数字信号便于处理和存储, 数字电路设计也比模拟电路的设计更加灵活, 调试和安装则更加简单。最近 10 年, 以现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, 简称 FPGA) 为处理单元的数字终端系统得到了大力发展, FPGA 方案不仅满足射电天文终端在计算复杂性和功能上的要求, 而且开发难度适中, 开发效率较高, 有很好的扩展性和延续性。涌现出如美国的可重构开放式架构硬件计算平台^[2] (Reconfigurable Open Architecture Computing

资助项目: 973 项目 (2015CB857100); 国家自然科学基金 (11403091, 11253001, U1431230); 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

通讯作者: 裴鑫, peixin@xao.ac.cn

Hardware, 简称 ROACH)、欧洲的 Uniboard^[3] 和中国的 VLBI 数据采集系统^[4] (Chinese VLBI Data Acquisition System, 简称 CDAS) 等被广泛应用于各类射电望远镜上的数字终端系统。

越来越多大型天线阵列的建造、多波束^[5, 6] 和超宽带接收机应用的推广、信号通道数和处理带宽激增, 都对数据处理性能提出了极高的要求。FPGA 不但资源有限而且很难实现逻辑控制, 较难满足超宽带和多波束接收机产生的超大数据量处理, 复杂算法更不易实现。

图形处理单元 (Graphics Processing Unit, 简称 GPU) 含有成百上千个计算核心, 内存带宽达到了数百 GB/s, 基于 GPU 并行计算的处理性能比多核多线程的 CPU 更优越, 尤其在 2007 年 Nvidia 发布了一款用于并行计算的统一计算设备架构^[7] (Compute Unified Device Architecture, 简称 CUDA) 后, 基于 GPU 的编程设计更加容易实现, 其计算性能也得到大幅提升, 利用 GPU 作为核心进行天文信号处理的方法迅速得到了推广。相对于以 FPGA 为核心的信号处理设备研制, 以 GPU 为核心的处理设备具有计算能力强、产品成熟、升级快、价格低、研制周期短等优势, 但 FPGA 有数字采样控制和接口、快速数据预处理等 GPU 不能替代的优势。因此, 通用数字终端多采用 FPGA 和 GPU 联合处理的混合架构^[8]。

美国 GBT 于 2011 年底开发了基于 FPGA+GPU 混合架构的通用频谱仪^[9] (VErsatile GBT Astronomical Spectrometer, 简称 VEGAS), 具备分子谱线、脉冲星、窄带总功率等多种观测功能, 适用于其单波束和 K 波段 7 波束双极化焦面阵接收机。采用 8 个双通道、最高 1.5 GHz 带宽的模数采样卡, 8 套 FPGA 数字信号处理板, 8 个 CPU+GPU 处理节点, 高速数据通过万兆以太网络进行传输, 能对 7 波束双极化 1.25 GHz 带宽的数据进行实时相干消色散处理, 谱线观测模式下最高谱分辨率达到了 30 Hz; 如对中频信号做频率分配, 可完成双通道 10 GHz 带宽信号的实时处理。

为降低望远镜终端系统的复杂度, 提升其可靠性并节约成本, 通用型数字终端成为未来的发展方向。

2 需求分析

QTT 的整体定位是将其建设成为具有多科学目标的通用型射电望远镜, 不仅能展开单天线课题如脉冲星、分子谱线、活动星系核、特殊射电源精细结构以及脉泽、宇宙暗物质和结构形成等观测研究, 也能进行高精度 VLBI 天体测量、天文地球动力学和空间 VLBI 观测研究, 还要兼顾航天器 VLBI 深空测轨、脉冲星深空自主导航以及脉冲星时间基准等应用研究。QTT 的各个组成部分都应根据这些科学和应用需求进行设计, 在观测终端配备方面, 需考虑以下因素:

(1) 功能上具备脉冲星、分子谱线、活动星系核、偏振、快速射电暴搜寻、波束合成、电磁干扰抑制和 VLBI 等观测能力;

(2) 性能上达到高采样速率、多数据通道、大动态范围、高稳定性、好可靠性、高精度、实时处理、高速数据存储和海量存储空间等指标;

(3) 系统匹配上适应多波束和超宽带接收机，匹配不同数据格式和监控接口软件，人机交互界面友好、易操作。

3 终端规划

虽然数字化信号获取方式已能实现大多数信号处理功能，但其依然具有一定的缺点，尤其是对于精度和稳定度要求较高的宽带连续谱观测 (诸如活动星系核射电流量变化监测和射电源精细结构的研究)，受模数转换器 (Analogue Digital Converter, 简称 ADC) 性能的限制，无法达到和平方律检波二极管同样的稳定性、线性度、动态范围和精确度 (下文将给出 ADC 和平方律检波器的性能对比和实验)。因此，我们可将连续谱单独作为专用的模拟终端，而将其他处理功能 (脉冲星、分子谱线、连续谱、偏振、波束合成和 VLBI 等) 整合起来作为一台多功能数字终端，QTT 终端总体规划如图 1 所示。

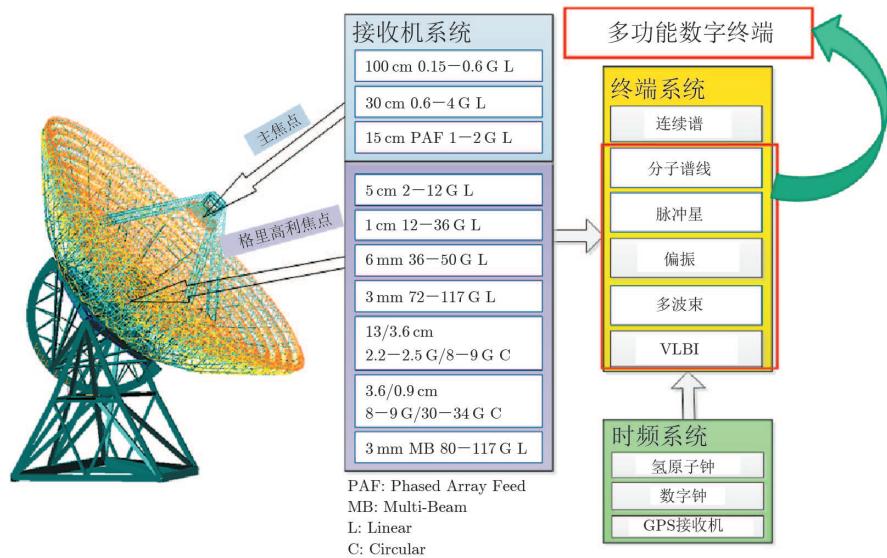


图 1 QTT 终端总体规划

3.1 连续谱终端

连续谱终端一般用来进行天线测量、宽带连续谱观测和接收机系统测试等，当前常用有两种方案：一种是采用平方律检波二极管进行模拟检波，输出功率与输入电压的平方成正比，即 $P_i = n V_i^2$ ；另一种方案是采用 ADC 进行数字采样和傅里叶变换，输出功率可由傅里叶变换后虚部和实部的平方和获得，即 $P = Re^2 + Im^2$ ，对于宽带信号须将所有频率通道进行相加取均值，因此这需要 ADC 在不同频点的响应一致。图 2 所示为 NS 公司给出的 ADC083000 频响图，在 1.5 GHz 的工作频率范围内，信号增益波动达到了 2 dB，这个变化对高精度的天文观测是不可容忍的。为了进行对比，我们对模拟检波器的频率响应也进行了测试，图 3

所示为 Herotek 公司的 DZM185AB 频响测试, 在 8 GHz 频率范围内的信号增益波动仅在 0.1 dB 以内, 精度极高。

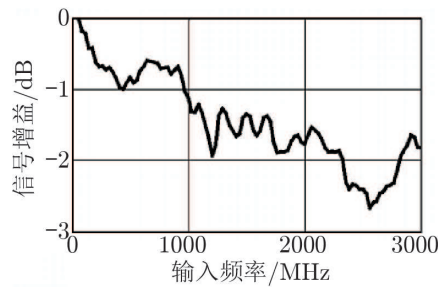


图 2 ADC083000 频率响应

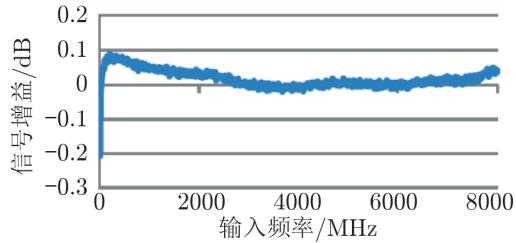


图 3 DZM185AB 频率响应

连续谱终端需考虑的另外一个因素是带宽, 模拟检波器的带宽可达到数十 GHz, 如上述实验中使用的 DZM185AB 可达 18.5 GHz, 而当前主流的 ADC 带宽一般在 3 GHz 以内, 为配合未来的超宽带接收机, 模拟检波器的方案更加适合。

另外, 模拟检波器的线性度好、稳定性高、温度响应好、动态范围大, 明显优于 ADC 方案。因此, 我们将采用模拟检波器的方案, 将连续谱终端作为独立终端进行设计。不过对于要求不高的窄带、低动态范围、高信噪比的总功率测量, ADC 方案也是可以胜任的。

3.2 多功能数字终端

图 4 为多功能数字终端总体架构, 与 FPGA 直连的 ADC 进行高速信号采集, FPGA 将数字信号进行预处理后打包发送到高速数据交换网络, 由位于后端的 CPU+GPU 集群实时获取数据并根据特定需求进行数据处理, 最后将数据进行保存和显示。对于多波束和超宽带接收机, 可将数据分为多个通道, 由多台 FPGA 配备 ADC 进行采集; 对于实时性要求较高的脉冲星搜寻等观测, 可增加 CPU+GPU 的数量, 实现实时处理。因此这种架构可满足不同观测课题、不同接收机类型等需求, 灵活性和可扩展性极高, 是未来的发展方向, 也是实现 QTT 通用型望远镜多种观测模式的较佳方案。但 QTT 的观测方式众多、接收机类型不同、当前 VLBI 联测终端专用化, 这些因素都将阻碍通用数字终端的设计和发展。另外, 为保证超大量数据的高保真实时传输、实时存储与复杂算法实时处理, 还需在超宽数字基带模式数据传输与存储、基于 GPU 集群的天文信号处理等方面进行一些技术攻关。当前的主要研制难点如下。

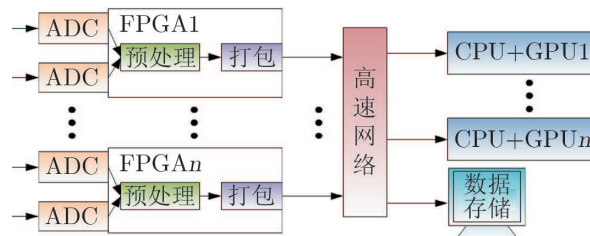


图 4 多功能数字终端总体架构

(1) 实现通用观测平台

如图 5 所示, 多功能数字终端需要满足通用性要求, 适应不同的接收机类型、观测功能和观测模式。不同类型的观测课题在信号的采集、数据处理和输出格式等方面存在较大差异, 超宽带、多波束接收机对终端系统的硬件架构也有不同要求, 加之单天线和 VLBI 观测有着不同的数据处理和记录模式。如何兼顾这些差异, 设计出兼容性好的通用数字终端架构是需要解决的首要技术难题。

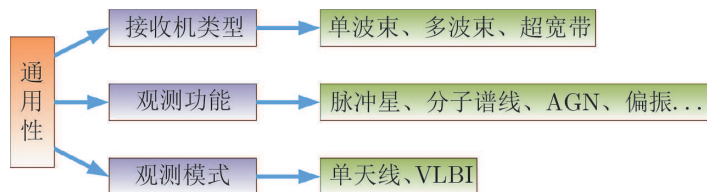


图 5 通用性要求

(2) 超大数据量采集、传输、处理

数字基带模式可利用 ADC 和 FPGA 进行数据采集和简单预处理, 然后直接将基带数字信号输出和存储, 这种原始基带信号是实现不同观测应用处理的较佳方案。但在实际工程应用中, 由于超宽带和多波束接收机数据量巨大, 以 QTT 拟配备的 60 波束 15 cm 波段相控阵 (Phased Array Feed, 简称 PAF) 接收机为例, 1 G 带宽双极化时的总体采样速率达到了 240 Gs/s, 而当前常规终端系统都难于满足该要求, 因此需解决超大数据的高保真实时传输、实时存储与复杂算法实时计算等难题。

(3) 基于 GPU 集群的天文信号处理技术

GPU 以其超强的并行运算性能得到了天文终端技术人员的一致认可, 但对于未来带宽数 GHz、通道数超过百个的超宽带和多波束接收机来说, 往往需要组建 GPU 集群的方式来进行处理, 虽然 GPU 的并行运算能力较强, 但其逻辑运算和控制能力较弱, 需要依赖 CPU 进行协同处理。由于 GPU 与 CPU 在处理性能、内存带宽、体系结构、编程模型等方面存在差异, 尤其是扩展到集群规模级别时程序开发较为困难, 为使处理效率达到最大化, 还需做进一步的研究。

4 前期工作

为了对 QTT 终端进行合理的规划, 对其关键研制难点进行评估, 我们进行了一些预先研究工作, 具体如下。

(1) 研制了一台模拟总功率终端样机^[10]。根据南山 25 m 射电望远镜各接收机的中频输出信号功率、频率和环境温度范围, 合理选择二极管检波器的型号, 设计、制作微波功率测量电路; 并利用微波信号发生器、微波功率计、数据采集模块等仪器设备在 LabVIEW 软件平台下搭建了基于虚拟仪器的检波器自动测试系统, 对二极管检波器的频率响应、线性度和

温度响应等进行了测试, 挑选出性能最好的二极管型号; 然后根据测试结果对电路进行调整, 并更换选中类型的其他二极管, 使电路的匹配与二极管的性能均达到最佳, 最后为该检波器设计并加工金属盒。设计的总功率检波模块如图 6 所示。



图 6 总功率检波模块

(2) 基于 ROACH 开发平台研制了一套双通道实时相关机, 用于微波全息法天线面形测量^[11]。采用了带通采样、数字混频和数字滤波技术, 无需在相关机之前进行基带转换, 采样带宽为 500 M, 信号带宽和频率分辨率都易于调整, 具有很大的灵活性和可扩展性。对该相关机的动态范围、稳定性、准确性、可重复性等性能进行测试, 相位稳定性测试结果如图 7 所示, 连续 10 h 的测量, 标准偏差小于 0.03°。经过长期测试调整, 该相关机达到了较高的测量精度, 满足全息法测量精度要求。

(3) 基于 ROACH 平台开发了一台脉冲星观测终端样机, 观测带宽 400 M。在南山 25 m 射电望远镜 L 波段进行了试观测, 源 B0329+54 的观测结果如图 8 所示, 该数据与欧洲脉冲星网 (European Pulsar Network, 简称 EPN) 公布的结果较为吻合。

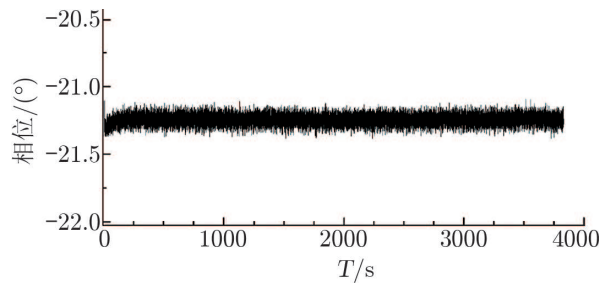


图 7 相关机相位稳定性测试结果

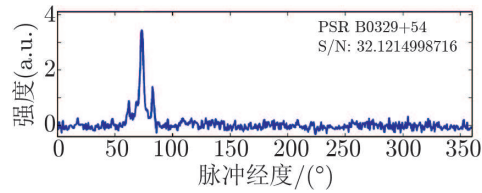


图 8 脉冲星 J0332+5434 的观测结果

(4) 进行了 10 GbE 网络、磁盘读写、GPU 加速比等性能测试, 基于 FPGA+GPU 混合架构完成了双通道实时相关器的设计, 硬件连接图如图 9 所示, 利用严格时序的 FPGA 进行采样和预处理, 基于 CUDA 平台开发实现 GPU 并行运算信号处理与 CPU 逻辑控制、存储和显示。测试结果表明, 该相关器运行稳定、准确, 通过调节混频、滤波和傅里叶变换参数即可实现通带范围内任意频带高精度测量, 频谱分辨率能达到几赫兹。

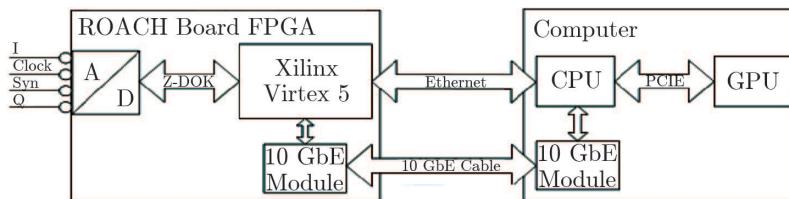


图 9 混合架构终端硬件连接图

5 展 望

QTT 的终端设计在超高速率、多通道、多量化位数采样、传输和 GPU 集群信号实时处理, 以及电磁干扰、电磁兼容性等方面还面临着许多挑战, 我们邀请海峡两岸天文界、计算机领域的同仁一起合作, 进行终端技术力量整合, 实现软硬件平台互助、经验分享, 共同攻克技术难关。

参考文献:

- [1] 王娜. 中国科学, 2014, 44(8): 783
- [2] Peter McMahon. M.Sc. Thesis, Cape Town: University of Cape Town, 2008: 25
- [3] <http://www.radionet-eu.org/fp7wiki/lib/exe/fetch.php?media=jra:uniboard:uniboardjune 2010.pdf>
- [4] 朱人杰, 张秀忠, 韦文仁, 等. 天文学进展, 2011, 29(2): 207
- [5] Staveley S L, Wilson W E, Bird T S, et al. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1996, 13: 243
- [6] Hay S G, O'Sullivan J D, Kot J S, et al. The Second European Conference on Antennas and Propagation, 2007, 2: 1
- [7] http://sbel.wisc.edu/Courses/ME964/2008/Documents/Programming_Guide_1.1.pdf
- [8] Terry Filiba. PhD. Thesis. California: University of California, 2013: 4
- [9] Prestage R, Chen H, Bloss M, et al. Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), Vancouver, Canada: IEEE, 2015, 294.
- [10] 裴鑫. 硕士研究论文. 北京: 中国科学院大学, 2011: 37
- [11] 裴鑫, 李健, 陈卯蒸, 等. 天文研究与技术, 2015, 12(1): 54

Back-ends Scheme and Pre-research of Xinjiang 110-m Radio Telescope

PEI Xin, NIE Jun, LI Jian, CHEN Mao-zheng

(*Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

Abstract: The back-ends system of the 110-m diameter fully moveable radio telescope which already in the future construction schedule is considered and planned in the paper. According to the development trends of radio astronomical back-ends, considering the needs of difference observation research, and after detailed analyzed the importance factors such as function, performance and system matching, a simple but practical back-ends architecture scheme will be shown in this paper, which includes an analogue continuum terminal and a digital universal machine. And then we discuss the difficulties and key points in the development procedures. The previous research work is introduced briefly in the end.

Key words: radio astronomy; astronomic back-ends; heterogenous architecture; GPU