QTT超宽带多波束信号接收与处理系统

马军^{1,2*}, 裴鑫^{1,2*}, 王娜^{1,2}, 李健^{1,2}, 王凯^{1,2}, 刘艳玲^{1,2}

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

*联系人, 马军, E-mail: majun@xao.ac.cn; 裴鑫, E-mail: peixin@xao.ac.cn

收稿日期: 2019-01-14; 接受日期: 2019-02-27; 网络出版日期: 2019-06-10

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)资助项目

摘要 新疆奇台拟建的110 m全可动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT), 主要用于脉冲星观测、引力波及黑洞探测、恒星形成和星系起源等基础科学研究领域. 为了满足众多科学需求, 将配备各种超宽带、多波束、高灵敏度接收机与处理系统, 其主要功能是将射电望远镜收到的微弱的电磁波信号经接收机放大、滤波、变频之后在数字终端进行处理. 由于该系统决定了射电望远镜的工作带宽、瞬时带宽和视场, 并与灵敏度具有紧密联系, 因此作为该大型射电望远镜的重要组成部分, 对于望远镜的性能具有至关重要的作用. 本文具体展示了QTT超宽带多波束信号接收与处理系统配置方案和主要性能指标, 系统地论述了QTT接收机与信号采集与处理系统初步技术方案, 分析了信号接收与处理系统的关键技术问题.

关键词 QTT, 接收机, 超宽带, 多波束, 信号接收与处理

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

1 引言

新疆天文台拟在新疆奇台县石河子村建设110 m口径全向可转动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)^[1], 工作频率覆盖0.27–115 GHz. 根据主要的科学目标和目前国内外的接收机以及数字信号处理技术发展水平, QTT计划配备从40 cm到3 mm波段多台宽带、超宽带低噪声制冷外差接收机, 具备脉冲星、暂现源、分子谱线、总功率和VLBI基带数据等信号处理模式. QTT在南天方向观测天顶距约83°, 覆盖银心以南11°的天区, 满足射电天文学多种实测研究课题对

长时间跟踪观测的需要. QTT的成功建设可以显著促进我国在脉冲星观测研究、引力波探测、黑洞发现、恒星形成和星系起源等基础科学研究, 并有望在一些射电天文研究领域跃入国际前沿. QTT是一台承前启后的国际一流科研装置, 其高灵敏度、大可视天区和宽频率覆盖将与国内外现有和正在建设的射电望远镜在科学目标方面相互补充, 且在国际上全面提升从厘米波段到3 mm波段的观测能力.

信号接收与处理系统是射电望远镜的核心设备, 决定了射电望远镜的频率覆盖、瞬时带宽和视场, 并与射电望远镜的灵敏度紧密相关, 因此对于望远镜的

引用格式: 马军, 裴鑫, 王娜, 等. QTT超宽带多波束信号接收与处理系统. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 099502

Ma J, Pei X, Wang N, et al. Ultra wideband and multi-beam signal receiving and processing system of QTT (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 099502, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0014](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0014)

性能具有至关重要的作用, 其技术指标的先进性也在很大程度上代表了一台射电望远镜的先进性, 因此得到了世界范围内广大研究人员的关注. 本文论述了 QTT 超宽带多波束信号接收与处理系统配置方案和主要性能指标, 并就 QTT 接收机与信号采集与处理系统初步技术方案进行了介绍.

2 信号接收与处理系统组成与功能

信号接收与处理系统是 QTT 的核心设备, 主要将射电望远镜天线收到的射电源信号经放大、滤波、变频等处理后将中频信号送入信号采集与处理系统. 系统技术指标要求世界领先, 具有超宽带、极低噪声和高可靠稳定等特点, 能够实现脉冲星、分子谱线、暂现源、活动星系核和 VLBI 等观测的要求, 具备消色散、谱线、总功率和偏振等处理模式. 系统主要由接收机系统、信号采集与处理系统、时间与频率系统、制冷系统和监控与测量系统等建设内容组成. 系统构成如图 1 所示.

2.1 接收机系统

接收机系统位于整个信号接收与处理系统的最前端, 具有频率从 0.27–115 GHz 主要频段覆盖接收的能力, 具有极高的灵敏度. 接收机由低温制冷前端、噪声注入及相位定标单元和常温变频单元组成, 能够从自由空间的电磁波中, 挑选出自己需要的频率成分, 抑制或滤除不需要的信号, 然后经过放大、变频送入后端. 其中, 馈源和低噪声放大器是接收机子系统的核心器件, 对于望远镜的工作带宽和灵敏度具有至关重要的影响. 因为到达接收机的射电信号极其微弱, 需要尽可能地对馈源网络、低噪声放大器、无源器件进行制冷, 降低接收机前端噪声温度, 提高射电望远镜系统的灵敏度.

2.2 信号采集与处理系统

信号采集与处理系统首先将所有接收机的中频信号在接收机房进行数字化、格式化、并进行电光转换后通过高速数字光纤传输至数字信号实验室^[2]. 为减少电磁辐射, 位于接收机房内的设备需采用小型化和低功耗设计, 所有数字设备需置于高效能屏蔽仓内. ADC 的采样精度(即 bit 数)决定其动态范围, 采样精度

越高, 动态范围越大, 反之亦然. 虽然 QTT 已经规划了无线电静默区(RQZ), 但台址的电磁环境是复杂的, 无法保证在各个频段都不会受到电磁干扰. 根据前期在台址的测试结果, 低频波段受电磁干扰的程度较高频波段强. 因此, 根据不同频段受电磁干扰程度, 将数字采样的精度也进行划分, 以适应不同干扰下的信号强度波动, 初步规划如下: 12 GHz 及以下频段需采用 12 bit 及以上采样, 12 GHz 及以上频段可采用 8 bit 及以下采样. 数据处理部分接收数字化的接收机信号, 并根据不同的科学目标进行处理, 能够实现脉冲星、分子谱线、暂现源、活动星系核、VLBI 等观测的要求, 具备消色散、谱线、总功率和偏振等处理模式.

2.3 时间与频率系统

时间与频率系统根据各观测终端及前端接收机信号需求, 为其提供高稳定度、低噪声的频率基准信号和相应的时间衍生信号, 时间频率传输具有抗干扰、低噪声的传输性能要求, 以及具备频率相位实时监测和快速调节(补偿)能力. 未来的 QTT 时频系统应同时具备时频信号快速应急切换能力(包括手动、自动和远程控制功能), 满足系统调试、检测及日常观测等多样化要求, 保障时频信号的高效持续输出.

2.4 制冷系统

制冷是提高射电望远镜灵敏度的有效措施. 在 QTT 信号接收与处理系统中, 制冷系统将各台制冷接收机杜瓦的第一、二冷级分别制冷到 70 和 20 K 以下, 从而保证杜瓦内部微波器件工作在低温环境, 以此降低整个接收机的噪声温度, 提升接收机的灵敏度. 系统要求满足现有接收机需求, 并且未来具有可扩展性.

2.5 监控与测量系统

监控与测量系统主要对接收机系统、时频系统、制冷系统、恒温系统、终端进行监测、控制、数据记录和报警等. 例如, 接收机控制功能主要完成接收机系统中频信号切换、本振调整、噪声强度调整和制冷机控制等工作; 接收机监测功能主要负责采集各波段接收机制冷杜瓦真空度、制冷温度、本振信号、工作频率和噪声注入幅度等指标数据并记录, 发现数据异常及时报警; 接收机测量功能主要完成系统温度测量和相位测量等工作.

图 1 信号接收与处理系统组成

Figure 1 Overall architecture of receiving and processing system.

3 接收机系统

在给定望远镜反射面的情况下, 望远镜低温接收机的性能决定了整个射电望远镜系统的灵敏度. 低噪声、超宽带、多波束是低温接收机技术未来发展的趋势^[3-5]. QTT是110 m口径格里高利型标准抛物面天线, 焦径比为0.33, 具有主焦和格里高利两个焦点位置, 根据科学目标和特殊任务的不同需求, 需要配备10台多样多频段的接收机, 其中40 cm, 15 cm单波束接收机和20 cm波段相位阵(Phased Array Feed, PAF)接收机在望远镜主焦点工作, 5 cm, 2 cm波段单波束接收机, 13/3.6 cm和3.6/0.9 cm波段双频接收机、7 mm双波束接收机以及1.3 cm和3 mm波段多波束接收机在望远镜格里高利焦点工作. 接收机具有超宽带、低噪声和多样性等特点, 能够满足不同观测需求. 表1给出了QTT各个波段接收机主要技术指标.

3.1 超宽带单波束接收机

传统接收机的工作带宽仅在一个倍频程左右, 因此为实现超宽的频率覆盖, 一台反射面天线往往需要

配备数套不同频段的接收机, 并通过一套复杂的馈源切换系统实现分时超宽带工作. 或者通过多频段馈源共用一个焦点、频率选择表面来实现同时的宽频段覆盖. 但多频段的馈源网络不仅复杂庞大, 还难以实现连续频率覆盖. 因此QTT将配备多套超宽带单波束接收机, 使反射面天线不仅能获得连续的超宽频带性能, 满足不同观测需求同时, 还可以有效减少接收机数量, 降低天线建设和运行维护成本. 具有代表性的是15 cm波段和5 cm波段超宽带单波束接收机.

3.1.1 15 cm波段超宽带接收机

该接收机主要由馈源、低温制冷前端、常温单元、定标单元、智能电源与监控单元组成, 系统功能如图2所示. 接收机射频带宽0.7-4 GHz, 双线极化分三段同时输出. 馈源采用四脊喇叭的形式, 此馈源采用在喇叭底部馈电形式, 有四个馈电端口, 如图2所示. 通过在喇叭口添加波纹槽和喇叭中间添加介质材料实现工作频带内方向图的等化特性. 馈源中四脊部分和加载的介质制冷到70 K以下以降低其对接收机噪声温度的贡献. 噪声定标单元为接收机系统注入所需

表 1 QTT接收机系统主要技术指标表

Table 1 The specifications of QTT receivers

接收机类型	波段名称	频率范围 (GHz)	焦点位置	极化方式	接收机噪声温度 (K)
单波束	40 cm	0.27–1.8	主焦	双线极化	20
	15 cm	0.7–4	主焦	双线极化	15
	5 cm	4–12	格焦	双线极化	15
	2 cm	12–30	格焦	双线极化	15
双频	13/3.6 cm	2.2–2.5 8–9	格焦	双圆极化	30/12
	3.6/0.9 cm	8–9 30–34	格焦	双圆极化	12/30
双波束	7 mm (36波束)	30–50	格焦	双线极化	35
相位阵	20 cm PAF (96单元)	0.7–1.8	主焦	双线极化	20
多波束	1.3 cm (19波束)	18–26.5	格焦	双线极化	15
	3 mm (37波束)	80–115	格焦	双线极化	40

图 2 (网络版彩图) 15 cm波段超宽带接收机原理图

Figure 2 (Color online) The schematic diagram of 15-cm ultra wideband receiver.

的定标信号, 用来确定系统的噪声变化. 噪声初步采用在制冷低噪声放大器之前注入方式, 同时正在开展在接收机外部注入噪声的方法的研究.

用于天线主焦的宽带馈源性能决定此套接收机的好坏, 馈源不仅要具有超宽带的阻抗特性, 还必须在超宽频带内实现恒定的波束宽度与稳定的相位中心, 这对于实现反射面天线的高效率尤为重要. QTT项目团队经过对目前世界上现有的对数周期馈源、Eleven馈源、QSC (Quasi-Self-Complementary) 馈源、Sinuous

馈源和四脊喇叭(Quad-Ridge Flared Horn)^[6–10]等主要宽带馈源各自的特点研究后, 四脊喇叭最适合15 cm超宽带接收机.

四脊喇叭利用脊波导截止波长较长的特性, 以逐渐张开的四脊波导实现能量的双极化宽频带定向辐射. 其特点是馈电方便, 插入损耗较小. 但其属于口径天线, 因此方向图和相位中心随频率有一定变化. 国内外的研究学者对四脊喇叭进行了大量的研究工作, 对四脊喇叭主要的设计参数与性能的关系进行了深入分

析, 并为改善四脊喇叭在宽频带内的照射采取了多种方法, 主要包括改变脊片曲线和喇叭内壁曲线的函数及参数、采用优化的方法对脊曲线和喇叭内壁曲线进行赋形、逐渐展宽脊宽、在四脊喇叭口面增加扼流环, 以及在喇叭内部加载介质等. 澳大利亚的研究学者采用多种方式对四脊喇叭的性能进行了提升(图3), 在 6:1 的带宽内, 实现了 70% 的照射效率^[11].

3.1.2 5 cm 波段超宽带接收机

5 cm 波段低温接收机主要由宽带光壁赋型喇叭馈源、低温制冷前端、常温单元、噪声定标源和相位校准单元、智能电源和监控单元组成, 系统组成如图4所示. 接收机射频带宽 4–12 GHz, 双线性化分段输出.

对数周期馈源、Eleven 馈源、QSC 馈源、Sinuous 馈源和四脊喇叭等馈源虽然具有超宽带特性, 但他们的局限性在于其照射角无法变窄以适应第二焦点的馈电, 而常见的波纹喇叭虽然能够实现性能优良的窄波束, 但工作带宽仅有 2.5:1, 无法满足超宽带的应用需求. 而通过优化的光壁赋形喇叭则能够在更宽的带宽内实现良好的照射^[12–19]. 图5给出了CSIRO为ATCA研制的 4–12.25 GHz 的馈源, 照射效率达到了 60%^[20].

作为超宽带接收机的核心部件, 四脊喇叭和光壁赋形喇叭为不同照射角的超宽带接收机提供了解决方案, 国外已经有了成功的案例, 国内也在开展相关工作, 在保证照射效率的前提下, 有望实现更宽的工作

图 3 (网络版彩图) CSIRO 研制的 0.7–4 GHz 的介质加载四脊喇叭

Figure 3 (Color online) CSIRO 0.7–4 GHz quad-ridge flared horn.

带宽. 这都为 QTT 研制超宽带接收机提供了强有力的技术保障.

3.2 多波束接收机

增加波束数量是扩大射电望远镜视场、提高巡天速度的最直接途径. 以往主要通过增加馈源数量的方式实现多波束^[21,22], 天线波束的数量与馈源数量一致. 这一方案的主要缺点在于: 受馈源物理尺寸的限制, 各馈源相位中心相距较远, 而馈源的偏焦距离与波束的偏角密切相关, 因此波束间隔很大, 无法实现连续的

图 4 (网络版彩图) 5 cm 波段超宽带接收机原理图

Figure 4 (Color online) The schematic diagram of 5-cm ultra wideband receiver.

图 5 (网络版彩图)CSIRO研制的4–12.25 GHz的介质加载四脊喇叭

Figure 5 (Color online) CSIRO 4–12.25 GHz quad-ridge flared horn.

天区覆盖. 同时, 偏离焦点的焦面场与馈源口面场失配, 导致非轴向波束性能下降, 限制了天线的波束数量. 而相位阵馈源^[23]可以较好地解决这些问题.

3.2.1 20 cm波段相位阵接收机

20 cm波段(PAF)接收机主要由低温制冷前端、常温微波单元、数字光纤传输单元、实时波束合成单元、PAF数据处理终端、智能电源与监控单元和制冷机组组成, 系统功能图如图6所示. 接收机射频带宽1–2 GHz, 双线极化输出, 为了尽可能降低接收机噪声温度, 96个单元馈源阵列和第一级低噪声放大器整体制冷, 输出信号经滤波放大之后直接由数字化光纤传输. 96波束布局如图7所示.

用于射电天文的相位阵馈源(Phased Array Feed)技术研究始于20世纪末, 该技术以放置在反射面天线

焦平面附近的小型相位阵天线作为多波束馈源, 与传统的多馈源的方式相比, 相位阵馈源可以形成紧密交叠的波束, 实现连续的天空覆盖, 还能够通过适当的激励, 补偿馈源偏焦造成的相位误差, 从而将偏轴波束的增益提高至与轴向波束相当的水平.

其与多喇叭馈源的主要区别在于: 以多个阵元代替单个喇叭照射反射面, 阵元数量与天线波束数量无必然联系. 阵元复用, 每个阵元的输出信号被用于多个波束的合成. 主要具有以下优点: 快速巡天, 相位阵馈源能够同时提供数量更多、相互交叠且性能更为相近的波束, 有效提高射电望远镜的巡天速度. 改善照明, 通过适当赋权的波束合成, 提高望远镜口径效率, 同时抑制远旁瓣, 降低漏失引起的噪声温度, 提高射电望远镜的灵敏度.

图8以抛物面天线为例, 给出了相位阵馈电反射面天线系统模型: 来自射电源的电磁波经天线面反射后, 汇聚于焦点附近, 被位于焦平面的馈源阵列接收, 并经低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)放大、后续放大(可变频)及采样后送入数字波束合成网络, 赋权合成后输出.

此外, 相位阵馈源还有消除电磁干扰^[24]、补偿反射面变形^[25]及减小望远镜结构扰动影响^[26]的功能. 鉴于上述优点, 相位阵馈源成为包括SKA在内的新一代射电望远镜的代表技术之一. 目前国际上主要有荷兰ASTRON、美国BYU/NRAO、澳大利亚CSIRO和加拿大NRC等国的研究机构在进行相位阵馈源技术研究^[27–29]. 此外, 我国也正在以500 m口径球面射电望远镜(FAST)为对象, 开展研究工作^[30]. 图9给出了国外四种相位阵馈源的照片.

由于馈源阵列互耦噪声的存在, 以及有源阻抗引起的LNA噪声提高, 相位阵馈源的系统温度与喇叭馈源相比, 限制了望远镜单个波束的灵敏度, 这是

图 6 (网络版彩图) 20 cm波段相位阵接收机原理图

Figure 6 (Color online) The schematic diagram of 20-cm PAF receiver.

图 7 (网络版彩图) 20 cm波段相位阵接收机馈源阵列布局图

Figure 7 (Color online) The feed array layout of 20-cm band PAF receiver.

图 8 相位阵馈源系统模型

Figure 8 The schematic diagram of PAF receiver.

其发展中亟需解决的问题. 此外, 由于加工工艺和器件的限制, 相位阵馈源主要集中在X频段以下, 多喇叭形式的焦平面阵列仍是高频段馈源的主要形式.

3.2.2 1.3 cm波段多波束接收机

1.3 cm波段多波束接收机主要由多波束低温制冷前端、常温滤波放大分频单元、定标单元、常温变频单元、智能电源和监控单元等组成, 系统功能图如图10所示. 接收机射频带宽18–26.5 GHz, 双线极化输出, 分两段同时输出, 带宽分别为18–22.25 GHz和22.25–26.5 GHz, 然后经常温变频单元将射频信号降频至5 GHz以下.

QTT 1.3 cm波段多波束馈源拟实现19波束, 按六边形分三环排布, 即第一环一个中心波束, 第二环6个波束, 第三环12个波束. 图11给出了各个波束的效率仿

图 9 (网络版彩图)射电望远镜相位阵接收机样机. (a) 荷兰 APERTIF; (b) 美国GBT PAF; (c) 澳大利亚ASKAP; (d) 加拿大AFAD

Figure 9 (Color online) 20-cm PAF receiver of radio telescope. (a) Netherlands APERTIF; (b) America GBT PAF; (c) Australia ASKAP; (d) Canada AFAD.

真结果, 其中效率包括了照射、漏失、相位和极化等因素的影响. 可以看出, 中心波束的效率达到了78%, 随着喇叭偏离焦点距离的增大, 波束效率有所降低. 第二环由于各喇叭偏离焦点的距离一致, 故效率相同, 为77.5%. 最外环的效率最低, 在76.8%–77.0%. 19个波束的效率最大差别为1.5% (0.065 dB), 下降并不明显. 为便于巡天观测, 喇叭间距在满足其口径的物理尺寸条件下, 使两个相邻波束的间隔角度正好是天线波束宽度的整数倍, 以优化其巡天路径, 提高巡天速度.

QTT 1.3 cm波段多波束馈源为多喇叭形式, 各个喇叭分别独立的照射反射面, 形成不同指向的波束. 其优点在于各波束间的耦合较弱, 系统噪声温度低, 具有较高的灵敏度, 且不需要波束合成网络, 对后端处理的设备能力要求较低. 由于反射面天线波束的偏轴角度与喇叭的偏焦距离相关, 而喇叭的偏焦距离主要取决于其物理口径, 为减少QTT各个波束的间距, 1.3 cm段多波束馈源拟采用光壁赋形喇叭作为基本单元. 光壁赋形喇叭通过优化内壁的曲线, 调整喇叭各个传输模式的幅度和相位, 性能与波纹喇叭相近, 且避免了复杂的波纹波导结构, 有效减小了喇叭的径向结构尺寸, 有利于实现更为紧凑的波束覆盖, 同时降低了加工难度与成本. 图12给出了为QTT 1.3 cm波段多波束馈源设计的光壁赋形喇叭的仿真模型. 该喇叭口径为162 mm, 长477 mm.

图 10 (网络版彩图)1.3 cm波段多波束接收机原理图
Figure 10 (Color online) The schematic diagram of 1.3-cm multi-beam receiver.

图 11 各个波束天线效率仿真结果
Figure 11 Simulation results of beam efficiency.

4 数据采集与处理系统

为了提高信号保真度, 减少信号在传输过程中因

图 12 (网络版彩图)1.3 cm波段馈源喇叭仿真模型
Figure 12 (Color online) The simulation model of 1.3-cm band feed.

环境变化而造成的信号增益和相位波动, 同时, 考虑强电磁干扰对信号传输链路的高动态范围要求, QTT计划在接收机端直接对信号进行数字化, 然后通过高速数字光纤链路传输至信号处理机房。当前, 有多种方式可以实现这种信号采集和传输模式。JESD204B是一种新型的基于高速SERDES的ADC/DAC串行数据

传输标准, 可以在多个当前模式逻辑(Current Mode Logic, CML)通道上实现12.5 Gbps的传输速率, 由于采用分离的信号采集和处理设计, 单个通道的信号采集与传输功耗可降至1 W以下, 澳大利亚ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder)的PAF系统采用了该技术方案^[31], 在接收机端对188路射频信号进行数字化, 然后再通过数字光纤传输至信号处理端. 为了对19单元、双极化的FLAG (Focal L-band Array for the GBT)接收机^[32]进行信号采集和传输, 美国NRAO研发了专用的模-数-光模块^[2,33], 采用小型、集成化的模块在接收机端直接对38路射频信号进行采样, 然后通过38路单模数字光纤链路传输至信号处理端, 传输速率为2.5 Gbps, 采用高性能屏蔽盒降低电磁辐射, 在信号处理端设计专用光电接收模块进行数字光信号接收与转换, 然后在FPGA中进行比特和字节对齐. 射频片上系统(Radio Frequency System on Chip, RFSoc)是美国Xilinx公司在2018年年初推出的面向5G无线通讯和雷达的射频直接采样技术新产品, 该芯片集成了FPGA, ARM, ADC/DAC和网络传输等很多资源, 单块芯片最多可实现16通道2 GSPS-12 bit或8通道4 GSPS-12 bit采样, 信号采集与传输功耗比分立式的JESD204B设计还要低, 信号采样带宽较NRAO设计的模-数-光模块要宽很多, 加之该芯片集成度高、价格便宜, 也非常适合射电天文的应用, ASKAP计划采用

此芯片进行下一代PAF接收机的信号采样和传输.

QTT信号采集与处理系统也将基于RFSoc技术进行设计, 如图13所示, 本系统由射频多路开关、信号采集与预处理前端、高速数据交换网络、信号处理后端、快速存储磁盘阵列和PAF信号采集与处理等部分组成.

QTT信号采集与处理系统拟采用FPGA+CPU/GPU混合式架构进行设计, 利用严格时序的FPGA集成ADC对接收机输出的中频信号进行采集和预处理, 并将数据发送至高速以太交换网络, CPU/GPU集群从该网络接收数据并进行相应处理, 可根据计算强度需求配备CPU和GPU处理核心数量, GPU可针对计算量较大的数据进行并行处理, CPU主要完成逻辑控制、数据流转控制、文件生成和数据显示和监测等, 处理结果存储至高速磁盘阵列. 目前, 国际上许多天文终端都采用了这种架构^[34-36], 此架构非常灵活、极易扩展和升级, 更多通道数或更大带宽的接收机接入, 可通过增加或更换FPGA信号处理板来实现, 更大数据量和复杂算法的更改, 可通过增加计算节点或优化算法来提升.

为节约成本、简化系统, 多套接收机可共用信号采集与预处理前端, 采用模拟下变频单元将单个宽带信号变换至多个窄带信号, 并采用射频多路开关在不同接收机间进行信号切换. 由于不同频段受电磁干扰

图 13 (网络版彩图)信号采集与处理系统总体架构

Figure 13 (Color online) Overall architecture of signal acquisition and processing system.

程度不同, 数字采样精度也有所区别, 12 GHz及以下频段需采用12 bit及以上采样, 12 GHz及以上可采用8 bit及以下采样.

由于接收机将分别安装于主焦点和格里高利焦点, 物理位置相距较远, 因此, 在主焦点和格里高利焦点接收机房都放置了信号采样与预处理板. 信号处理板可工作在交替采样模式下, 每块实现双通道4 GHz带宽、12 bit采样. 主焦点接收机房规划1台信号处理板, 可实现2路最高4 GHz带宽、12 bit采样, 通过控制射频多路开关可选择40 cm波段或15 cm波段接收机信号切换. 40 cm波段接收机需2路信号接入, 15 cm波段接收机需2路信号接入. 20 cm波段96单元双极化PAF接收机将采用独立的信号采集与预处理, 采用2 GSps, 12 bit采样, 经预处理后输出192单元、1 GHz带宽、8 bit精度的数据, 此部分与接收机集成. 从PAF采集的数据通过40/100 GbE光纤网络传输至信号处理机房, 由PAF合成器进行波束合成, 然后输出36波束、双极化、1 GHz带宽、4/8 bit精度的数据, 信号后处理部分可与其他接收机信号公用计算资源.

格里高利焦点接收机房规划了19台信号处理板, 可实现38路最高4 GHz带宽、12 bit信号采样, 由于成本限制, 3 mm波段的多波束接收机仅选择采集和处理部分带宽, 未来可以继续升级. 通过控制射频多路开关可选择5 cm波段单波束、2 cm波段单波束、13/3.6 cm波段双波束、7 mm波段双波束、1.3 cm波段19波束或3 mm波段37波束接收机.

信号采集与预处理部分放置于主、副接收机房内, 尽管采用了高集成度、低功耗的芯片设计, 但望远镜灵敏度较高, 需设计专用高效能屏蔽柜, 并将其置于柜内以降低电磁辐射.

信号处理后端由管理节点和高性能计算节点组成, 通过高速数据交换网络和信号采集与预处理前端连接, 为降低信号采集与预处理前端的功耗从而降低其电磁辐射, 尽量将计算强度高的算法移至信号处理后端, 如射频干扰(RFI)滤除、多相滤波(PFB)、傅里叶变换(FFT)、消色散、折叠、Stokes参数计算、脉冲星搜寻和暂现源探测等都基于GPU进行计算.

为满足超宽带、多波束, 尤其是PAF接收机的多数据通道、大数据带宽和高计算强度的信号处理, 初步规划了36个计算节点, 每个节点配备2块CPU和4块GPU高性能核心. 例如, 针对20 cm波段的PAF, 信号通

道在72个左右(按双极化36波束算), 如信号带宽为1 GHz, 采用8 bit数据精度, 则每秒需要处理的数据达到了1152 Gb, 每块GPU核心需实时处理500 MHz带宽信号(数据速率8 Gbps). 根据初步计算, 当前规划可满足脉冲星处理需求, 但RFI滤除算法计算量随电磁环境变化较大, 无法准确估计. 因此, 采用了可伸缩的高速以太网架构, 并预留了部分高速网络接口, 如需更大的计算资源, 可投入更多的节点.

高速数据交换网络用于信号采集与预处理前端、信号处理后端和快速存储磁盘阵列间的数据交换, 可采用40/100 Gb速率以太网标准, 满足大数据吞吐量、低延迟、低丢包率等要求. 初步规划了512个40/100 Gb端口, 交换总速率为20 Tb/s以上.

快速存储磁盘阵列用于高速数据暂时存储, 一般在观测完成后对数据做进一步处理, 通过降低时间、频谱分辨率和数据精度来压缩数据, 最后将数据传输至数据中心进行永久存储. 根据数据记录速率最高的基带模式要求, 初步规划最大存储带宽为4 GB/s, 存储空间为1 PB, 按此最大速度可持续写入72 h, 未来有需求再进行升级.

控制计算机根据不同的观测需求加载和调用相应的FPGA固件和CPU/GPU软件程序即可实现对应的功能. 根据QTT主要科学目标, 信号采集与处理系统规划有脉冲星、暂现源、分子谱线、总功率、VLBI基带数据等信号处理模式. 为方便监测与控制, 终端提供丰富的接口供其他系统查询和配置, 包括运行状态查询、信号质量监测、观测结果显示等.

5 结论

信号接收与处理系统是QTT工程的核心设备, 本文系统性地介绍了QTT超宽带多波束信号接收与处理系统, 重点对关键子系统接收机部分和信号采集与处理部分进行了阐述, 并介绍了QTT信号接收与处理系统整体方案设计. 整个QTT信号接收与处理系统结构极其庞大和复杂, 系统技术指标要求极高. 建设一套具有超宽带、极低噪声和高可靠稳定等特点的超宽带、多波束信号接收系统, 再匹配大信号带宽、高动态范围、超高数据速率的信号处理系统, 是实现QTT科学观测目标的技术保障, 同时也是QTT工程项目的难点和挑战.

致谢 本文呈现的内容是QTT项目团队多年来共同努力的结果.

参考文献

- 1 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]
- 2 Morgan M A, Fisher J R, Castro J J. Unformatted digital fiber-optic data transmission for radio astronomy front-ends. *Publ Astron Soc Pac*, 2013, 125: 695–704, arXiv: [1305.0795](#)
- 3 Morgan M, Fisher J. Next generation radio astronomy receiver systems. *Instrum Methods Astrophys*. 2009, arXiv: [0908.3849](#)
- 4 Chen M Z, Liu Q, Ma J, et al. Ultra-wideband receiver technology development for radio astronomical large aperture telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 059504 [陈卯蒸, 刘奇, 马军, 等. 大口径射电望远镜超宽带接收机发展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059504]
- 5 Wu S Y, Nan R D. Applications of the focus plane array or the multi-beam feed system in radio astronomy (in Chinese). *Prog Astron*, 2001, 19: 421–435 [吴盛殷, 南仁东. 射电天文焦面阵或多波束馈源的应用. 天文学进展, 2001, 19: 421–435]
- 6 Cortes-Medellin G. The 64 m Sardinia radio telescope optics design. In: *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Antonio, 2002
- 7 Yang J. Preliminary design of Eleven Feed for SKA Band 1. In: *Proceeding of 31th URSI General Assembly and Scientific Symposium*. Beijing, 2014
- 8 Engargiola G. Non-planar log-periodic antenna feed for integration with a cryogenic microwave amplifier. In: *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Antonio, 2002
- 9 Cortes-Medellin G. Non-planar quasi-self-complementary ultra-wideband feed antenna. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2011, 59: 1935–1944
- 10 Gawande R, Bradley R. Towards an ultra wideband low noise active sinuous feed for next generation radio telescopes. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2011, 59: 1945–1953
- 11 Dunning A, Bowen M, Bourne M, et al. An ultra-wideband dielectrically loaded quad-ridged feed horn for radio astronomy. In: *Proceeding of IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications*. Turin, 2015
- 12 Dunning A, Bowen M, Chung Y. Offset quad ridged ortho-mode transducer with a 3.4:1 bandwidth. In: *Proceeding of 2013 Asia Pacific Microwave Conference*. Seoul, 2013
- 13 Skinner S J, James G L. Wide-band orthomode transducers. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 1991, 39: 294–300
- 14 Jacobs O b, Odendaal J W, Joubert J. Quad-ridge horn antenna with elliptically shaped sidewalls. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2013, 61: 2948–2955
- 15 Akgiray A, Weinreb S, Imbriale W A. The quadruple-ridged flared horn: A flexible, multi-octave reflector feed spanning $f/0.3$ to $f/2.5$. In: *Proceeding of 7th European Conference on Antenna and Propagation*. Sweden, 2013. 768–769
- 16 Bauerle R J, Schrimpf R, Gyorko E, et al. The use of a dielectric lens to improve the efficiency of a dual-polarized quad-ridge horn from 5 to 15 GHz. *Ieee Trans Antennas Propagat*, 2009, 57: 1822–1825
- 17 Akgiray A H. New Technologies Driving Decade-bandwidth Radio Astronomy: Quad-ridged Flared Horn and Compound-semiconductor LNAs. Dissertation for Doctoral Degree. Pasadena: California Institute of Technology, 2013
- 18 Yang J, Flygare J, Pantaleev M, et al. BRAND: Development of quadruple-ridge flared horn with spline-defined profile for Band B of the wide band single pixel feed (WBSPF) advanced instrumentation program for SKA. In: *Proceeding of IEEE Antennas and Propagation International Symposium (APSURSI)*. Fajardo, 2016
- 19 Xie L, Du B, Wu Y, et al. Design and optimization of a quadruple-ridged flared horn (QRFH) feed for SKA. In: *Proceeding of Submitted to IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*. Auckland, 2018
- 20 Kot J S, Granet C, Davis I M, et al. Wideband feed systems for radio astronomy. In: *Proceeding of 2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT)*. Sydney, 2014
- 21 Kildal P S, Johansson M, Hagfors T, et al. Analysis of a cluster feed for the Arecibo trireflector system using forward ray tracing and aperture

- integration. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 1993, 41: 1019–1025
- 22 Popenko N, Khaikin V, Lebedev M, et al. Highly effective array feed for RATAN-600 radio telescope in a multibeam mode. In: Proceeding of International Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Practical Applications. Turunç-Marmaris, 2009
- 23 Wu Y, Du B, Jin C J, et al. Phased array feed technology for radio telescope (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2013, 28: 348–353 [伍洋, 杜彪, 金乘进, 等. 射电望远镜相位阵馈源技术. *电波科学学报*, 2013, 28: 348–353]
- 24 Hansen C, Warnick K, Jeffs B. Interference cancellation using an array feed design for radio telescopes. In: Proceeding of IEEE Antennas Propag Society. Monterey, 2004. 539–542
- 25 Rahmat-Samii Y. Array feeds for reflector surface distortion compensation: Concepts and implementation. [IEEE Antennas Propag Mag](#), 1990, 32: 20–26
- 26 Van Cappellen W A, Bakker L, Oosterloo T A. APERTIF: Phased array feeds for the westerbork synthesis radio telescope. In: Proceeding of General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, 2011
- 27 Warnick K F, Carter D, Webb T, et al. Towards a high sensitivity cryogenic phased array feed antenna for the Green Bank Telescope. In: Proceeding of General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, 2011
- 28 Chippendale A, Schinckel A. ASKAP: Progress towards 36 parabolic reflectors with phased array feeds. In: Proceeding of General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, 2011
- 29 Veidt B, Hovey G J, Burgess T, et al. Demonstration of a dual-polarized phased-array feed. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 2011, 59: 2047–2057
- 30 Wu Y, Warnick K F, Jin C. Design study of an L-band phased array feed for wide-field surveys and vibration compensation on FAST. [IEEE Trans Antennas Propagat](#), 2013, 61: 3026–3033
- 31 Tuthill J, Bateman T, Hampson G, et al. The ASKAP phased array feed digital beamformer: Design overview and performance characteristics. In: Proceeding of PAF2016 Phased Array Feed Workshop. Cagliari, 2016
- 32 Roshi D A, Shillue W, Simon B, et al. Performance of a highly sensitive, 19-element, dual-polarization, cryogenic L-band phased-array feed on the Green Bank Telescope. [Astron J](#), 2018, 155: 202, arXiv: [1803.04473](#)
- 33 Morgan A M, Wunduke D S, Castro J J. Compact cm-wave and mm-wave integrated receivers. In: Proceeding of 32nd URSI GASS. Montreal, 2017
- 34 Price D C, Staveley-Smith L, Bailes M, et al. HIPSR: A digital signal processor for the parkes 21-cm multibeam receiver. [J Astron Instrum](#), 2016, 05: 1641007, arXiv: [1702.00443](#)
- 35 Hickish J, Abdurashidova Z, Ali Z, et al. A decade of developing radio-astronomy instrumentation using CASPER open-source technology. [J Astron Instrum](#), 2016, 05: 1641001, arXiv: [1611.01826](#)
- 36 Price D C, MacMahon D H E, Lebofsky M, et al. The breakthrough listen search for intelligent life: Wide-bandwidth digital instrumentation for the CSIRO parkes 64-m telescope. [Publ Astron Soc Aust](#), 2018, 35: e041, arXiv: [1804.04571](#)

Ultra wideband and multi-beam signal receiving and processing system of QTT

MA Jun^{1,2*}, PEI Xin^{1,2*}, WANG Na^{1,2}, LI Jian^{1,2}, WANG Kai^{1,2} & LIU YanLing^{1,2}

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

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

The proposed 110-m full-steerable radio telescope (Qitai radio telescope, QTT) in Xinjiang is mainly used in the fields of basic scientific research, such as pulsar observation, gravitational wave and black hole detection, star formation, galactic origin. At the same time, it serves national projects such as China Lunar Exploration project and Mars exploration. In order to meet the scientific needs, QTT will be equipped with a variety of ultra-wideband, multi-beam, high-sensitivity receivers and signal processing systems, to treat the weak electromagnetic wave signal received by the radio telescope, such as amplification, filtering, frequency conversion and other processing and sending to the digital terminal and processed. As this system determines the operating bandwidth, instantaneous bandwidth and field of view of radio telescopes, and is closely related to sensitivity, as a key part of the large radio telescope, it plays an important role in the performance of telescopes. In this paper, the configuration scheme and main performance index of QTT UWB and multi-beam signal receiving and processing system are demonstrated in detail. This paper systematically discusses the preliminary technical scheme of QTT receiver and signal acquisition and processing system, and analyzes the key technical problems of signal receiving and processing system.

QTT, receiver, ultra wideband, multi-beam, signal receiving and processing

PACS: 95.55.Jz, 95.45.+i, 02.40.Pe

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0014](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0014)