



评述

新疆奇台 110 米射电望远镜

王娜^{①②*}

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, E-mail: na.wang@xao.ac.cn

收稿日期: 2014-03-12; 接受日期: 2014-04-01; 网络出版日期: 2014-07-08

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11153002)

摘要 计划在新疆奇台建设的 110 米射电望远镜(简称 QTT)将位居国际一流大科学装置之列, 成为世界最大的全向可转动射电望远镜. QTT 在引力波探测、黑洞发现、恒星形成、星系起源等基础科学研究领域将发挥重要作用, 并可发展应用于深空探测, 如探月工程和火星、金星探测. QTT 设计方案考虑多种科学目标的需求, 其关键技术包括: 大口径天线结构设计技术、天线主动面技术、大惯量机架精密伺服控制技术、超宽带馈源技术、低噪声放大器技术、多波束接收技术等. QTT 关键技术的突破与应用, 将促进我国信息、精密机械加工和自动控制等工程技术领域的发展. QTT 各系统建设将以自主创新为主, 通过国际合作引进和采用相关尖端技术完成.

关键词 射电望远镜和仪器, 外差接收机, 天文观测, 台址测试

PACS: 95.55.Jz, 95.85.-e, 95.45.+i

doi: 10.1360/SSPMA2014-00039

1 引言

数千年来, 人类对宇宙天体的观测被束缚在可见光波段, 直至 20 世纪 30 年代, 无线电工程学迅猛发展, 美国工程师卡尔·央斯基在寻找无线电噪声源的试验中无意发现了来自银河系中心的射电辐射, 这个发现引起了国际天文学界的轰动. 二次世界大战期间, 使用雷达探测到来自太阳的无线电信号, 使人们第一次认识到宇宙天体确实存在无线电辐射, 宇宙天体就像发射可见光波一样发射无线电波, 射电天文学从此迅速发展, 打开了传统光学波段以外人类认识宇宙的一个全新观测窗口. 80 年来, 射电天

文学已经发展成文天文学的重要分支, 近代天文学的四大发现——类星体、脉冲星、星际分子和宇宙微波背景辐射无一不奠基于射电天文学, 显示了其强大的生命力. 这些重要发现至今仍然是天文学领域的研究热点. 以脉冲星为例, 从中子星的理论预言到夸克星的讨论、从发现第一个普通脉冲星到发现第一个太阳系外行星系统、从对脉冲星辐射机制的认识对磁星和射电暂现源的探测、从双中子星系统的发现到验证爱因斯坦引力理论, 无一不是在天体物理最前沿.

射电天文学和其他天文学科一样, 面临众多需要共同解决的基本问题, 例如宇宙是如何产生的, 又将如何演化, 暗物质与暗能量的存在证据, 探测黑

引用格式: 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783-794

Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 783-794, doi: 10.1360/SSPMA2014-00039

洞、引力波,认识时空的本质等等. 这些问题的解决将改变人类对宇宙的认知,甚至颠覆现有的物理框架. 对宇宙的探索,还将回答另外一个寓意深刻的问题,即生命起源以及地外智慧生命的发现.

透过地球大气,地面能接收的射电辐射窗是从 10 MHz–1 THz(30 m 至 0.3 mm),最长观测波长大约是最短波长的 3 万倍($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \approx 3 \times 10^4$),而在光学天文文中只等于 2 倍($\lambda_{\max}/\lambda_{\min} \approx 2$). 受限于馈源接收带宽,射电波段往往需要根据科学目标,分别研制米波、厘米波、毫米波甚至太赫兹射电望远镜.

新疆奇台 110 m 口径射电望远镜(QiTai radio Telescope, QTT)为全向可转动,工作波段覆盖 150 MHz–115 GHz. 根据科学目标和目前的馈源发展水平,可以配备 100 cm, 30 cm, 15 cm, 5 cm, 1 cm, 6 mm, 3 mm 等波段的宽带、超宽带低噪声制冷外差接收机^[1],具备总功率、偏振、频谱、甚长基线干涉测量(VLBI)等多种观测模式. 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 将是世界上口径最大的全可动望远镜,可以显著提高我国天体物理、天体测量、空间探测(例如月球、火星、金星探测)水平,并在一些射电天文研究领域跃入国际前沿. QTT 是一个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到 3 mm 波段的观测能力. QTT 关键技术的突破,将推动我国在信息、精密机械、自动控制等多个领域的发展^[2,3].

2 QTT 台址与测试

优良的台址是保证射电望远镜高效、安全运行并顺利实现科学目标的重要条件. 考察台址候选点的要素包括:气象条件、无线电环境、地理位置和局部地形、基础条件(道路、水、电、通讯)、地质条件、周边社会发展规划等. 对于大型射电望远镜,台址无线电环境和气象条件是影响望远镜运行效率最基本因素. 由于卫星的无线电发射产生的干扰是地面台站均难以避开的,所以在无线电环境方面主要是考虑来自地面无线电发射源的干扰情况. 而台址的气象条件在一定程度上决定大型射电望远镜的设计指标、运行安全和性能. 经过长期的监测、比对和评估,

综合考虑各选址要素,最终确定新疆昌吉回族自治州奇台县半截沟镇石河子村为 QTT 候选台址.

QTT 台址位于北纬 43°36'4".03,东经 89°40'56".99,海拔约 1760 m,距奇台县城以南直线距离约 46 km. 台址位于东天山北麓,是一处东西约 1.5 km、南北约 2 km 四面环山的矩形盆地,周围山梁海拔从 1860–2250 m 不等,与外围区域形成较好的隔离;盆地内东南高西北低,海拔约 1730–1830 m,封闭性好,可充分依托此地形进行无线电环境保护. 台址东侧仰角最高接近 12°,正南约 6.5°,北面山梁仰角约 6°,仰角分布可满足射电望远镜的观测要求. 园区地势较为平缓,植被条件良好,不易形成破坏性的泥石流;西侧是落差在 110 m 左右的中葛根河谷,无潜在的洪水威胁. 地质初勘和地震安全评估表明,园区下有稳固的基岩,可保障大型天线对地基等方面的要求,抗震指标可以设为 9 度抗震设防烈度不破坏.

基于整点极大风速分析台址风速的逐月分布,结果表明该台址 9 月至 3 月的秋冬季风弱于 4 月至 8 月的春夏季. 图 1 显示,台址不大于 4 m/s(三级)风的比例是 69.5%,不大于 6 m/s(四级)风的比例是 87.7%,不大于 8 m/s(五级)风的比例是 95.9%;作为对比,美国 100 m 口径射电望远镜(GBT)台址,不大于 8 m/s 风的比例是 79.2%. 对于极端情况,奇台大于 17 m/s(8 级)风的比例小于 0.14%,而 GBT 为小于 0.5%. 可见,就风荷影响而言,QTT 台址在保障天线安全运行和指向精度方面都将优于 GBT 台址.

从资料分析显示,奇台台址全年水汽含量夏季最大,约为 19 mm;春、秋季次之,约为 9 mm;冬季最小,

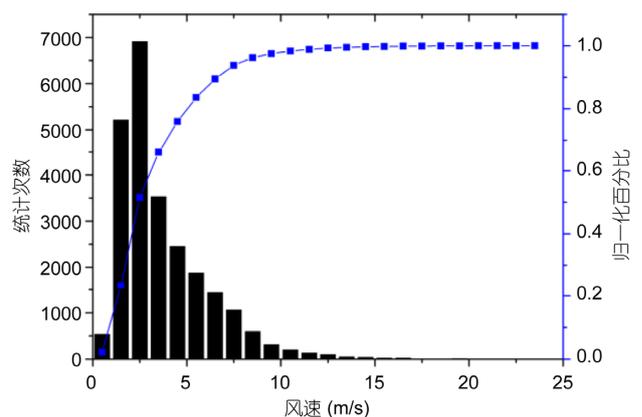


图 1 (网络版彩图)QTT 台址极大风速频度分布
Figure 1 (Color online) The distribution of maximum wind speed at QTT site.

约为 3 mm. 相比现有其他射电望远镜台址, 尤其是百米级的台址, QTT 台址在高频波段优势显著, 对于 6 mm, 3 mm 的分子谱线观测极为有利.

无线电环境监测采用符合 SKA-FAST 测量和处理规范的系统. 测量方式分为两种, 分别针对强干扰和弱干扰模式. 从无线电监测结果可以看出, QTT 台址周边无线电应用主要是 2-3 G 移动无线通讯(UHF, L, S 波段)、广播电视(模拟数字)(VHF, UHF 频段)、卫星电视无线差转系统(UHF, C 波段). 从奇台台址无线电频率占用度条形图(见图 2)可以看出, 台址无线电干扰主要集中在几个频段内, 并且 1 GHz 以上无线电频率占用度很小. 分析无线电占用度较大的频段, 发现是由于石河子村的手机基站和无线电视引起的, 随着牧民搬迁工作的完成, 这些基站也将拆除. 总体上 QTT 台址的无线电环境优良, 台址远离都市, 并且盆地地形对于电磁屏蔽具有一定作用, 有利于长期无线电环境保护.

3 技术方案

QTT 的硬件系统包含主反射器及其支撑机构、天线控制单元、主动面调整机构、副面调整驱动机构、接收机单元、数据终端单元、时间频率单元、台址监测单元(如图 3). 相应的其软件系统由天线及接收机控制软件、时间基准软件、环境监测软件、天线测量及修正软件、天文观测软件(如图 4)等组成.

3.1 天线方案

QTT 为格里高利抛物面天线, 采用主动面以克

服重力形变的影响^[4]. 天线的座架形式为轮轨式、方位俯仰型. 利用有限元方法分析, 天线反射体背架与天线座架的优化连接方式为类似德国 Effelsberg 的 100 m 口径全可动抛物面天线的伞形支撑结构^[5]. 主反射面采用赋形技术^[6,7], 即利用非标准抛物面, 提高天线在低频的接收效率. 然而后馈多波束馈源要求天线增益在波束内尽量均衡, 这要求天线的主反射面为标准抛物面. 因此若要实现理想后馈多波束, 最佳方案是主、副反射面都可在赋形与标准面之间转换. 可以通过副面促动器实现赋形副面到标准椭球面的转换, 实现主焦、格里高利焦点均可以多波束. 在此基础上, 要求采用快速天线测量^[8,9]与整形技术, 理想状态是实现天线主动面闭环控制, 以及及时修正天线因重力、日照、风荷造成的形变.

主反射面均方根误差(rms)在不用主动面调整的情况下要求达到 0.6 mm, 采用主动面时初期达到 0.3 mm, 经长期运行校准后达到 0.2 mm. 为实现上述目标, 采用蜂窝夹层以及蒙皮筋条结构面板, 利用负压成型工艺进行制造, 单面板的 rms 精度需达到 0.07 mm. 副反射面整体精度约为主反射面的 1/3, 即 rms 精度 0.07 mm, 单面板需好于 0.03 mm 要求.

天线效率在 5 cm 以下的低频波段好于 60%, 在 1 cm 以上高频波段分阶段逐步实现设计指标, 例如在 6 mm, 3 mm 波段, 天线效率经长期调试可以分别达到或超过 50%和 30%.

望远镜指向精度的要求依赖于环境因素, 当风速 ≤ 4 m/s, 温漂 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{h}$ 时, 盲找精度需达到 5 arcsec, 可重复精度达到 2.5 arcsec. 实现这个指标对天线控

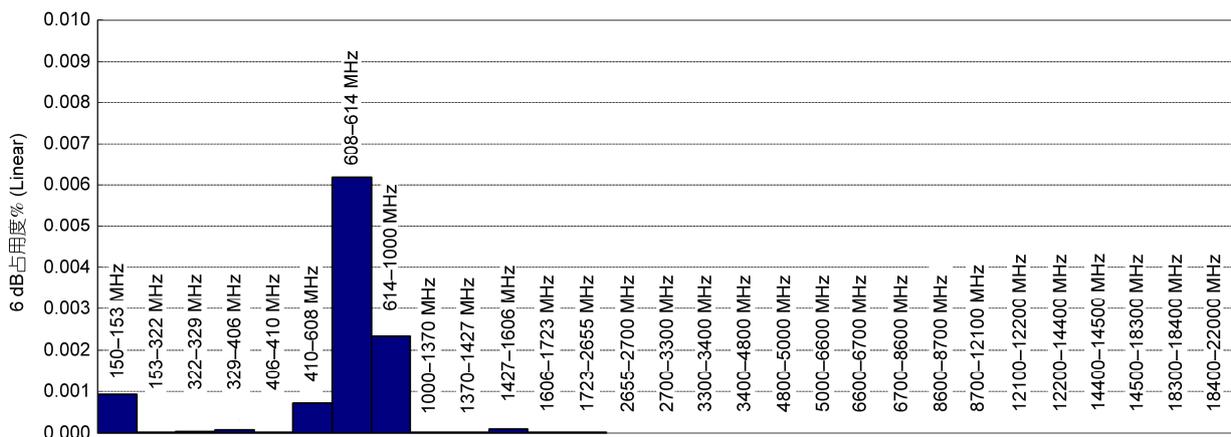


图 2 (网络版彩图) QTT 台址无线电频率占用度条形图

Figure 2 (Color online) The occupation ratio bar chart of radio band at QTT site.

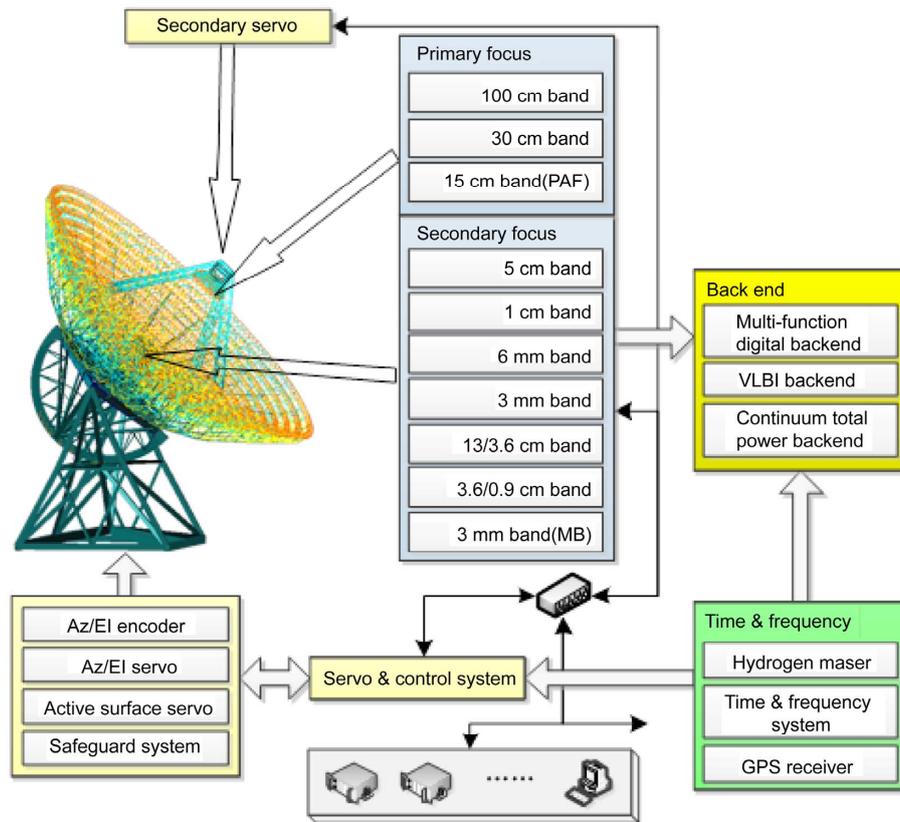


图 3 (网络版彩图)QTT 硬件系统框图

Figure 3 (Color online) The block diagram of QTT hardware system.

制要求很高. 对于大口径射电望远镜天线的精密控制, 仅采用传统的 PID 调节器是不够的. 由于 PID 方法存在微分环节, 对噪音敏感, 工程实践中常采用 PI 算法来代替 PID 算法^[10]. 天线的控制器将在 PI 调节器基础上, 结合复合前馈控制技术(FF)和线性二次高斯控制技术(LQG)来降低大型天线的指向误差, 有效消除风载荷的扰动, 提高大口径天线的控制品质. 国外大口径天线仿真与测试结果表明, 采用 LQG 控制器与 FF 前馈控制的组合控制方法, 跟踪误差和随机扰动误差均可大大减小, 对比数据见表 1.

射电望远镜, 尤其是大口径射电望远镜的灵敏度极高, 很容易受到各类电子设备辐射信号的影响. 射电望远镜本身就是一个大量电子电气设备的集成系统, 系统内和系统外的辐射信号及相互耦合导致望远镜的电磁环境极为复杂, 望远镜系统的电磁兼容是衡量系统性能的重要因素之一.

3.2 接收机与放大器

单波束接收机的馈电方式, 100 cm, 30 cm 低频波

段采用前馈, 其余波段采用后馈, 馈源切换时间在 10 s 以内. 接收机的技术方案需综合考虑脉冲星、分子谱线、VLBI、巡天等科学目标对设备的要求, 一般采用线极化方式. 现阶段考虑在 15 cm 波段、6 mm 波段分别研制相位阵馈源(PAF)和多波束接收机, 以实现高效率巡天观测. 根据目前的进展, 除了 VLBI 接收机, 其他波段均为线极化. 根据科学目标初步设计的接收机配备方案见表 2.

望远镜探测灵敏度可以通过配备超宽带接收机进一步得到提高, 并且与宽带数字终端匹配. 增加接收系统的带宽首先要拓展馈源的带宽, 同时还要兼顾输入驻波、插入损耗、极化隔离度等指标. 国内外都研发了各种形式的宽带/超宽带馈源并广泛用于无线电侦测、天线测量等领域, 以欧美国家领先且各具特色. 例如查尔姆斯理工大学研发了带宽比可达 10 倍的 Eleven 馈源^[11], Caltech 设计的一种四脊馈源在 2–12 GHz 的频带内具有 10 dB 以上的反射损耗, 而且各频率的波束宽度一致性很好^[12].

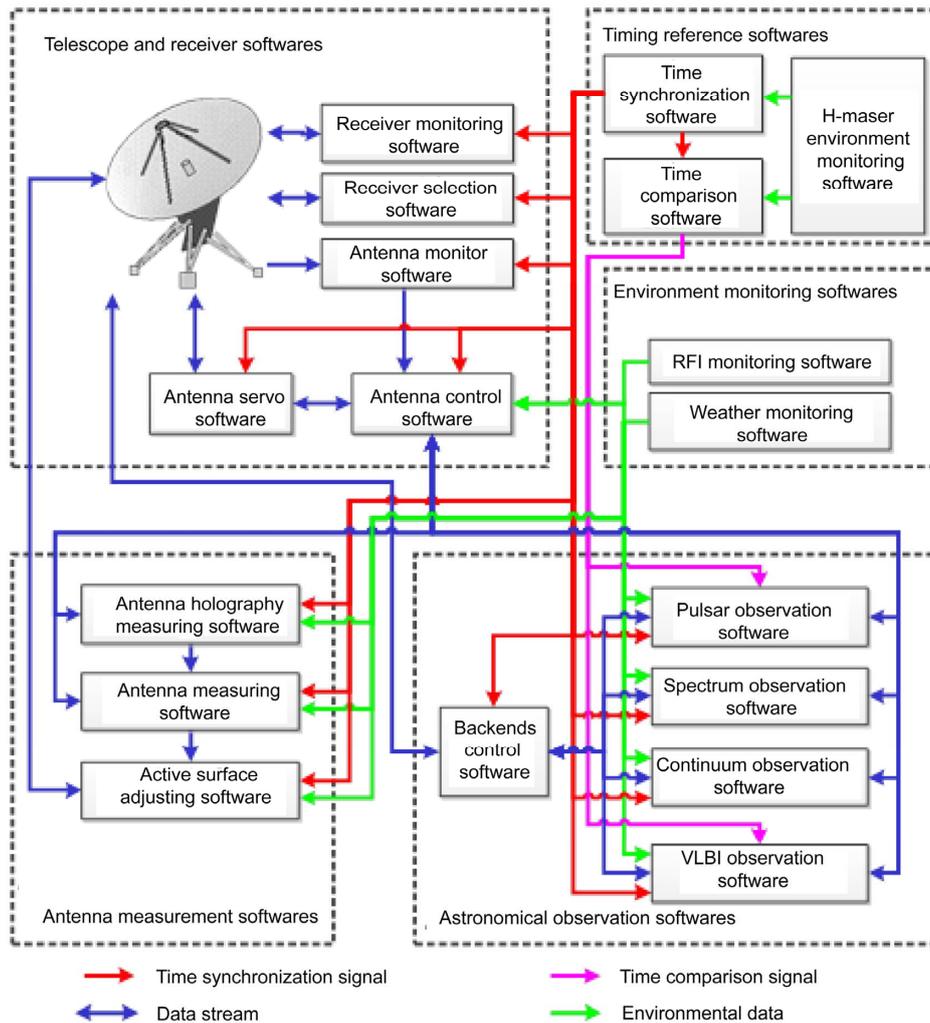


图 4 (网络版彩图)QTT 软件系统框图

Figure 4 (Color online) The block diagram of QTT software system.

表 1 各种控制方式精度对比

Table 1 Comparison of accuracy of different control methods

误差类型	控制方式			
	PID	FF	LQG	LQG+FF
跟踪误差(最大值 mdeg)	28.6	0.7	3.6	0.1
随机扰动误差(最大值 mdeg)	3.2	3.6	0.4	0.5
测量误差(最大值 mdeg)	28.7	3.67	3.7	1.5

低噪声放大器(LNA)是射电天文接收机的核心器件之一. 由于对噪声系数的要求高, 而需求量又非常少, 早期多采用分立元件设计, 少量研制. 随着微电子技术和低噪声半导体材料研究的进步, 基于单片微波集成电路(MMIC)技术的低噪声放大器性能不断提高. MMIC 低噪声放大器具有集成度高、可靠性高、一致性好、体积小、易于批量制造等诸多优势, 已

经是射电天文接收机的必然选择. 欧美相关研究机构在 MMIC 技术方面一直处于国际领先水平.

3.3 多功能数字终端

数字技术的高速发展在不断提升射电天文终端的性能, 而越来越高的信号采样速度对观测终端的处理速度和处理能力不断提出更高要求. 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 以及联合方式的发展历程. 未来的发展趋势是在接收机前端进行射频信号的直接采样量化, 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, 甚至于实现以前由模拟器件完成的功能, 如极化合成与转换、边带分离混频等. 根据当前的技

表 2 接收机配备初步方案

Table 2 The preliminary scheme for QTT receiver system

接收机类型	波段 (cm)	频率范围 (GHz)	焦点位置	馈源类型	极化	科学目标
单波束	100	0.15–0.6	主焦点	Kildal	双线	脉冲星, 暂现源
	30	0.6–4	主焦点	喇叭	双线	脉冲星, 暂现源, HI, OH, 星系
	5	2–12	格里高利焦点	喇叭	双线	分子谱线, 星系; VLBI
	1	12–36	格里高利焦点	喇叭	双线	脉冲星, H ₂ O, NH ₃ , VLBI
	0.6	36–50	格里高利焦点	喇叭	双线	分子谱线, 高红移 CO 谱线
双频	13/3.6	2.2–2.5, 8–9	格里高利焦点	喇叭	双圆	VLBI, 深空探测
	3.6/0.9	8–9, 30–34	格里高利焦点	喇叭	双圆	VLBI, 深空探测
多波束	15	1–2	主焦点	PAF	双线	脉冲星, 暂现源, HI, OH, 星系
	0.6	36–50	格里高利焦点	喇叭	双线	分子谱线, 星系

术水平, QTT 拟采用 FPGA 与 GPU 混合模式的多功能数字终端(见图 5), 实现射电信号实时高精度频谱分析、脉冲星相干消色散、多波束合成和 RFI 抑制等多功能处理. 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 完成不同天文观测算法的核心处理, CPU 则用于数据传输、逻辑控制和文件读写. 这种异构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.

3.4 数据传输与维护

QTT 内部各大分系统的设备采用超高速(10 Gbps

/10 GbE) 光纤以太网连接, 接受内部网络 IP 分配管理. 为了减小因网络产生的射频干扰, 在建筑物之间以及建筑物内部均采用光纤传输, 并通过光电转换器转换为通用的 RJ-45 接口连接计算机. 对路由器、交换机等网络交换设备进行整体电磁屏蔽. 园区采用星形拓扑结构组建局域网, 楼宇之间网络交换速率按照用途和业务不同在 1–10 Gbps 之间分配.

随着天文望远镜及终端设备设计与制造技术不断提高, 天文学正在进入一个“数据雪崩”时代. 天文信息爆炸式增长不仅给天文学家带来了天文发现的巨大机遇, 同时也带来了数据存储、访问和处理等方

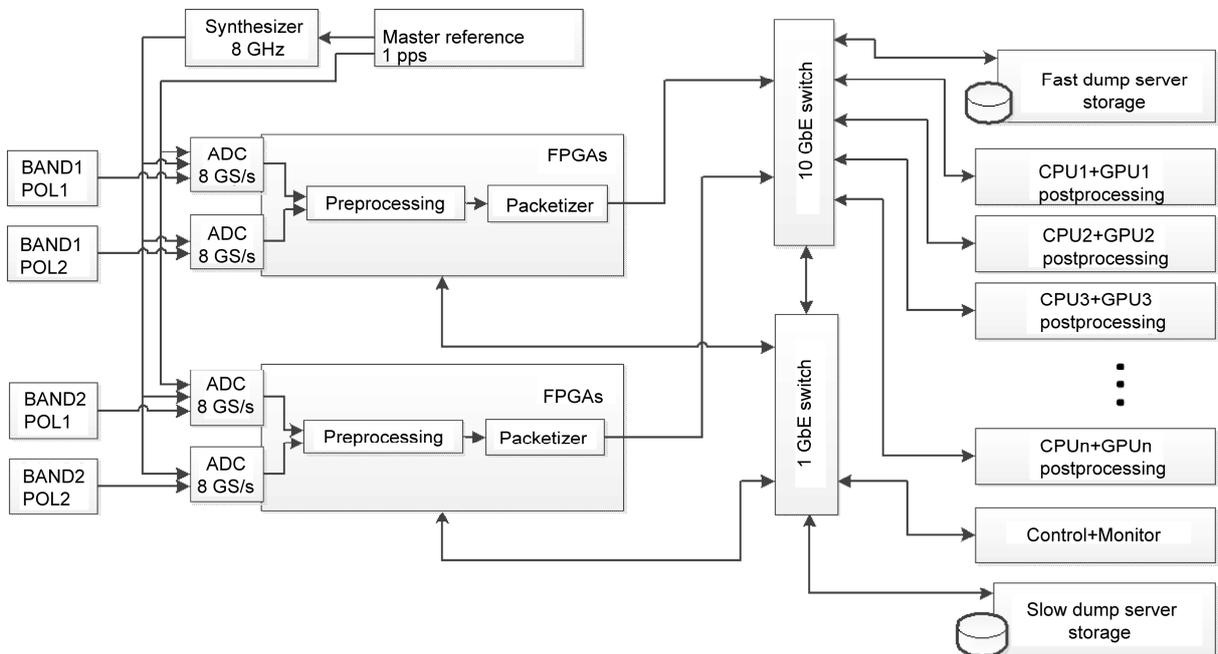


图 5 多功能数字终端框图

Figure 5 Overall architecture of multi-function digital backend.

面的巨大挑战. QTT 数据存储可以在构建多层次数据存储模型基础上, 采用基于 CWM(公共数据仓库元模型)的天文数据仓库体系结构, 存储、管理 QTT 产生的海量天文数据, 实现所有数据的集中可靠存储. 以 HEALPix 伪球面索引技术、并行计算技术为基础实现 QTT 数据的快速检索与基于虚拟天文台相关协议标准的数据发布.

4 科学目标

QTT 建成后的早期科学目标方面, 寻求在恒星形成与演化研究、脉冲星观测研究、星系和特殊射电源精细结构研究、宇宙暗物质和结构形成、高精度 VLBI 天体测量和空间探测应用、巡天发现更多未知天体等领域实现突破.

4.1 分子谱线与恒星形成和演化研究

射电分子谱线的发现及后续研究促进和推动了多个天体物理分支的发展, 例如银河系内恒星形成、星际介质、太阳系内天体(行星大气以及彗星等)、近邻星系中分子气体及恒星形成、早期宇宙星系中分子气体等^[13-15].

首先, QTT 的大接收面积, 先进的接收机和频谱仪, 使得对近邻星系中致密分子气体的成图观测研究成为可能. QTT 在 6 mm 及以下观测频率, 可以观测红移大于 1.4 的星系中的 CO(1-0), 红移大于 0.9 的星系中的 CS(2-1), HCN(1-0), HCO+(1-0) 以及 HNC(1-0) 谱线^[16]. 对这类星系中分子气体以及致密分子气体示踪物——分子谱线的探测, 对于研究这类星系中恒星形成规律有着不可替代的意义.

主序后的恒星星周气体中有大量的分子, 当中小质量恒星由渐近巨星分支阶段演化到行星状星云阶段, 星周包层的物理环境发生巨大变化, 从而导致其化学成分的变化. QTT 可以发挥高灵敏度的优势, 在 1 cm 至 3 mm 波段开展工作. 利用宽带接收机和频谱仪对这个频段进行 AGB 星包层以及行星状星云的谱线巡天, 搜寻已知和未知的分子发射, 这对于理解星际分子的起源以及天体化学有着很重要的意义.

超新星激波与分子云成协的确立, 有助于宇宙线加速机制的研究^[17]. 普遍认为宇宙线为超新星激波所加速, 而产生 TeV 伽玛射线的宇宙线主体——质子是否也同样由激波加速, 所加速的轻子(电子)和重子

(质子等)相对比例如何, 以及二者为超新星激波所加速的效率各是多大, 目前都尚难定论. 超新星遗迹的激波加速形成相对论质子撞击分子云, 是 GeV–TeV 伽玛射线的强子作用起源. 通过分子云中激波的特征性 1720 MHz OH 脉泽和其他如 SiO、CS 等谱线的多普勒分光频谱成像, QTT 将可以用于超新星遗迹伽玛射线与分子云成协性的全面调查, 为宇宙线粒子起源问题提供强力证据和丰富信息.

4.2 脉冲星观测研究及其应用

QTT 的高灵敏度和多功能数字终端将可以开展高精度的脉冲星观测研究, 例如大样本脉冲星高密度监测, 包括毫秒脉冲星的观测以研究其内部结构和自转噪声起源; 偏振和总功率观测以进行脉冲星辐射机制和星际磁场研究; 星际闪烁观测以开展星际介质研究. 目前在贵州建设的 FAST 望远镜, 将通过巡天发现数以千计的新脉冲星, 对这些脉冲星的后续观测极其需要具有跟踪能力、在灵敏度上可与 FAST 匹配的百米级望远镜. 这些新目标当中极有可能包含有未知类型的脉冲星, 对于进一步认识脉冲星分布、恒星演化、极端环境下天体辐射物理机制等具有重要意义.

对自转极其精确的毫秒脉冲星进行监测, 可以建立中国的脉冲星到达时间阵(CPTA, 示意图 6), 探测超大质量黑洞并合产生的引力波^[18]. 由于灵敏度的限制, 国内现有望远镜还不能够对引力波探测做出直接的贡献. 然而基于 QTT 的建设前景, 新疆

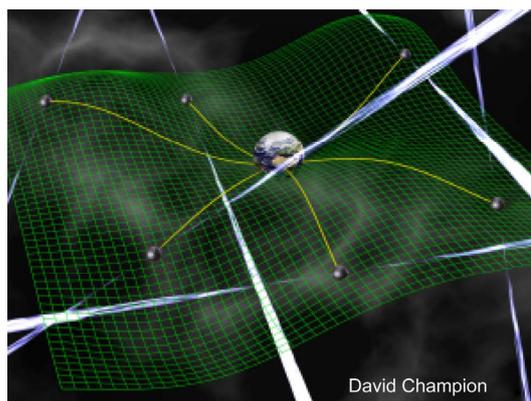


图 6 (网络版彩图)用于引力波探测的脉冲星到达时间阵列 (David Champion 制图)

Figure 6 (Color online) Pulsars forming the arms of a cosmic gravitational wave detector, or pulsar timing array (Credit: David Champion).

天文台已经被吸收加入相关国际合作, 并参与国际引力波探测网的研究工作^[19].

组成 CPTA 的脉冲星, 其自转稳定度可以与原子时相媲美(见图 7), 因此, 脉冲星的另外一个应用是建立基于脉冲星自转的新的时间频率基准, 即综合脉冲星时^[20]. 这种时间系统还可以进一步用于发现原子时漂移和未知变化, 研究地球自转以及太阳系星历表的微小变化.

脉冲星是航天器在宇宙当中的天然航标灯, 利用其周期性可实行自主导航定位. 这种导航方式尤其适用于行星际空间, 可以减少航天器对地面测控系统的依赖, 增强其自主生存能力. 自 1974 年美国^[21]首次提出用射电脉冲星进行星际导航设想以来, 已经于 1999 年搭载 USA 试验设备进行了实验, 其后又于 2004 年启动了“基于 X 射线源的自主导航定位验证”(XNAV)计划, 将分三个阶段进行可行性论证并完成 10 颗以上的 X 射线脉冲星的优选和编目、样机研制、演示验证. 计划中的 NICER 和 LOFT 卫星将有助于这一目标的实现. 国内多个研究部门已经启动了相关的研究, QTT 可以提供精确的脉冲星自转参数和数据库, 为我国航天器实现脉冲星深空自主导航提供必要的地面支撑.

4.3 活动星系核研究

宇宙中存在着大量的活动星系核, 其在射电波段表现为强烈的喷流和流量变化^[22]. 目前, 较为广泛接受的是活动星系核的相对论射束模型, 认为喷流是由 AGN 中心黑洞的吸积产生的. VLBI 所具有的极高分辨率使我们有可能得到关于黑洞附近射电喷发

的详细图像. 特别是通过 VLBI 偏振测量, 可以研究活动星系核中喷流的形成、加速和准直过程的物理机制, 揭示辐射源周围电子数密度、空间磁场位形等. 但目前 VLBI 成图的动态范围还比较低, 需要更多更大的射电望远镜参加进来提高灵敏度和分辨率. 高分辨率高灵敏度的观测仍是揭示活动星系核奥秘的关键手段. QTT 加入 VLBI 后, 在星系和特殊射电源精细结构研究方面将有助于取得突破.

AGN 的射电喷发还表现出剧烈的变化性, 使我们有可能从变化时标对其发射场的大小做出限制, 其中极短时标的变化(IDV)很可能对应着 AGN 中心辐射源的尺度, 是目前国际上单天线射电望远镜观测研究的热点之一. 但 IDV 现象是内禀起因还是星际闪烁起因依然存在争议. 若是内禀起因它将对研究 AGN 的物理过程有巨大推动; 若是闪烁起因, 也会对研究太阳系行星际、星际乃至星系际介质的性质提供重要数据. 110 m 口径的射电望远镜将大大提高国内 IDV 的观测灵敏度, 可以开展更暗弱的大样本 IDV 巡天观测研究.

4.4 宇宙暗物质和结构形成

QTT 加入高灵敏度 VLBI 阵列可进一步推进透镜中心像探测极限和暗弱矮星系的发现. 通过对射电强引力透镜系统进行高分辨率、高灵敏度观测并确定质量分布模型, 研究其中央尖晕和子结构, 在中小尺度上连接大尺度宇宙学数值模拟结果, 获得正确的宇宙演化图像^[23].

观测中性氢在不同红移不同尺度上的成团结构将使我们对于重子暗物质的分布有足够的了解, 从而有助于解决重子物质缺失的问题. 利用 QTT, 可以在星系群尺度上对红移 $z < 1$ 的中性氢分布进行大尺度巡天观测, 并与星系样本进行交叉相关从而确定大尺度上重子物质的分布.

如果作为宇宙暗物质候选者的弱相互作用大质量粒子(WIMP)是 Majorana 中微子, 在暗物质团中会有自湮灭过程发生, 其释放的正负电子在磁场中会产生同步辐射, 可能被 QTT 探测到, 从而了解暗物质的本质.

4.5 VLBI 天体测量、大地测量及其应用

QTT 投入 VLBI 观测后在天体测量方面将发挥多方面的作用.

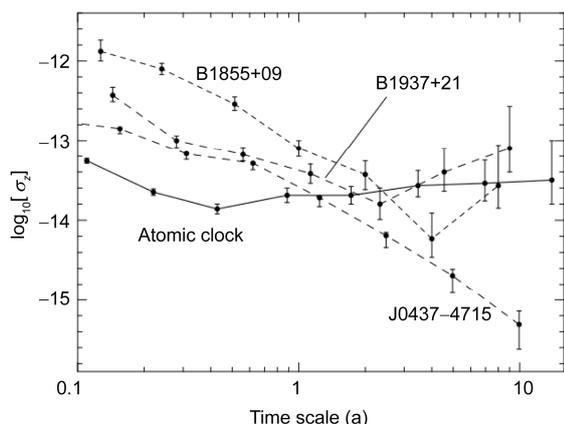


图 7 脉冲星与原子钟的稳定度比较^[20]

Figure 7 The stability of pulsar rotation and atomic clocks [20].

目前采用的国际天球参考架(ICRF)是1998年开始实施的. 2009年发布了ICRF的扩充版本——国际天球参考系统(ICRS). 通过VLBI精确测量了3414颗河外致密射电源的赤道坐标, 约 3.5×3.5 平方度一颗参考射电源. 深空探测器的精确定位是相对致密射电源进行的, 高精度测量要求在探测器附近 5° 以内有位置参考源. 改进了的ICRS可以基本满足深空探测等方面的应用需求, 但是该系统仍然存在很大的改进空间, 例如增加更暗弱源观测, 改进射电源的不均匀分布状况. 这要求选取更弱的射电源, 如 0.1 Jy , 甚至辐射更低的射电源. 为了对弱源达到高信噪比观测, 以精确测定它们的位置, 则需要大口径射电望远镜的观测.

天体测量和空间定位需要以天文参考系为基础, 射电参考系是通过河外致密射电源的位置定义的, 而光学参考系是用光学恒星定义的, 二者的连接是一个重要研究课题. 可以检测到射电辐射的光学恒星是建立射电与光学参考系连接的重要天体. 射电星的射电流量密度一般非常小, 比参考源的流量密度通常要小1-2个数量级, 需要大口径天线才有可能被探测到. 110 m射电望远镜投入VLBI观测, 将使VLBI观测的射电星增加一个量级以上, 即从目前的30颗左右增加到百颗以上. 观测结果用于射电和光学参考系的连接, 其连接精度可以提高到亚毫角秒级, 比目前的连接精度提高5-10倍.

在地球动力学研究中, 无论是对于地球整体的运动测量, 如地球自转变化, 还是测量地球的局部运动, 如现代板块运动, 新的研究方向均为测量其高频变化, 如地球自转的周日、半周日变化, 现代地壳运动的瞬时速率(月以内的时间尺度)等. 对于VLBI观测来说, 就要求更高的信噪比, 以实现短时间得到高精度数据, 采用大口径天线可达到上述目标.

QTT加入VLBI网对于我国深空探测及空间VLBI意义深远. 中国VLBI网(CVN)应用于探月工程, 在嫦娥一号至三号的测轨应用中发挥了重要作用, 今后CVN还将继续为探月工程进行测定轨. QTT加入CVN以后, 将显著提高CVN的探测灵敏度. 如果以佘山25 m、南山25 m、密云50 m与昆明40 m组成CVN基本单元, 那么CNV+QTT, 灵敏度将增加1.8倍, 加上刚建成的上海65 m射电望远镜, 即CNV+QTT+65米, 国内VLBI的灵敏度将提高3倍. 新的中国VLBI网将为探月以及更遥远的深空探测任

务, 例如金星、火星探测, 提供更高精度的轨道测量和高灵敏度的数据接收.

位于欧亚大陆中心射电望远镜空白区域的QTT, 对于欧洲VLBI网(EVN)的贡献也非常显著, 将改进uv覆盖, 同时在多个波段上提高系统的灵敏度达到30%-70%. 另外, 地面大口径VLBI站将显著提高空间甚至月基VLBI的探测灵敏度, 地面与空间站联合观测, 是实现射电天球参考系、卫星动力学参考系以及地面参考系连接的唯一手段.

4.6 巡天发现更多的未知天体

研究表明原恒星附近有高的温度和气体密度, 对分子气体的搜寻主要集中在恒星形成区. 不同的有机分子示踪不同的天体物理环境, 例如, 含氮分子具有高气体温度和低丰度, 而含氧分子具有低气体温度和高丰度^[24]. 因此, 复杂的含氮和含氧有机分子可用来探测分子云热核的物理和化学环境.

使用QTT进行有机分子搜寻, 包含对不同演化类型的恒星形成区进行含氮、含氧、含硫等分子的搜寻和成图观测. 此项工作的目的是研究星际空间中某些有机分子的化学反应路径以及认识不同的分子示踪怎样的物理环境. QTT性能在1 cm至3 mm波段上达到国际一流的水平, 而这个波段是地球大气留下的一个重要射电窗口, 有很多分子谱线处于这个频率范围. 例如, 在1 cm波段, 可观测谱线为500条左右, 而1 cm至3 mm波段, 可探测谱线有2000多条(见图8). 国际天文界在此波段观测较少, 主要望

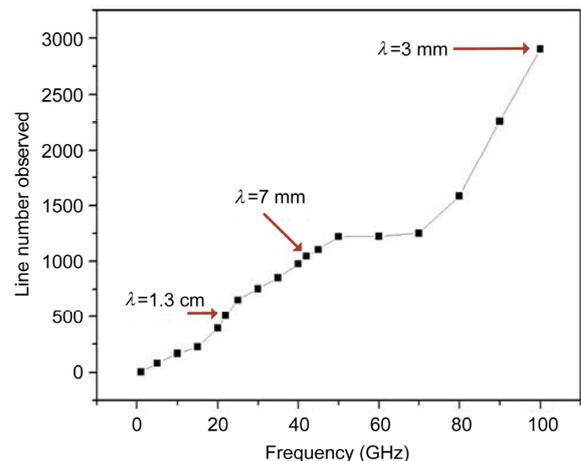


图8 (网络版彩图)可观测分子谱线数量与频率的关系
Figure 8 (Color online) The spectrum line number versus observing frequency.

望远镜有 GBT 和日本的 45 m 射电望远镜。目前 GBT 的观测时间竞争非常激烈, 大部分观测季, 在分子谱线观测方面的申请时间是望远镜有效时间, 即可提供天线时间的 4–10 倍, 近乎和哈勃空间望远镜的申请相当。即使是在 10 年后, 大口径望远镜在该领域仍然会有大量前沿工作可以进行。如果装备多波束宽带接收机, 可同时观测多条分子谱线, 并使巡天效率大大提高。

很多有机分子具有大的偶极距, 其旋转跃迁一般落在低频波段。而且当某种分子的丰度很低(相对于氢小于 10^{-11})时, 在毫米/亚毫米波段很难探测到它的跃迁, 但有可能在低频波段探测到。QTT 由于其大口径和台址低频干扰较少, 很适合在低频波段搜寻和观测有机分子。

脉冲星巡天使脉冲星的研究始终充满了旺盛的生命力。以往每项成功的巡天不仅增加了研究样本, 还往往伴随着对新现象新类型的发现^[25]。亚毫秒脉冲星和脉冲星—黑洞系统的发现将成为下一个巡天热点。QTT 将使用先进的宽带接收机技术, 结合数字消色散系统的高频率分辨率和宽带处理能力, 对北天银道面进行巡天。QTT 的长时间跟踪能力特别对极端消脉冲星、长周期脉冲星、短时标暂现源、银河系中心脉冲星的发现有利。QTT 的脉冲星巡天重点还包括中高银纬天区的搜寻、球状星团的搜索和北半球高纬度天区的搜寻。QTT 将主要对 Arecibo 所不能到达的天区和 GBT, Effelsberg, Jodrell Bank 等大型天线没有搜索过的区域进行深度脉冲星搜寻。

5 讨论与结论

5.1 再探射电望远镜

天体辐射的电磁波极其微弱, 要发现更暗弱的天体和研究更精细的结构, 提高射电望远镜的灵敏度和分辨率成为关键。通常有两条途径可以增加天线接收面积以提高探测灵敏度, 第一是建设单口径大型射电望远镜, 第二是化整为零, 建设口径 15 m 左右阵列式天线。二者各有优势, 也有各自局限性, 主要应根据科学目标确定方案。前者对于天线结构有很高要求, 但是在馈电和接收方面相对简单和灵活, 有利于系统更新和及时采用最新的接收技术; 后者天线制造简易, 将大口径天线的结构困难分解为小天线, 有效接收面积原理上不受限制, 信号叠加转化为

电子技术问题, 数据接收与处理的复杂性大为提高。

以脉冲星观测为例, 由于脉冲星信号是动态的, 电磁波在星际介质中传播造成群延迟, 为了得到准确的脉冲到达时间, 需进行改正以得到相同波前的信号, 也就是消色散。因此, 脉冲星观测数据要求极高的时间和频率分辨率, 采样精度要达到至少几十微秒, 有些特殊高精度的基带观测系统, 要求在几个 GHz 的全波段范围内进行尼奎斯特(Nyquist)速率采样, 对数据在线处理的速度要求极高。相比较而言, 阵列天线实现信号相位的稳定同步本来就已经非常困难, 如果要求宽带/超宽带 Nyquist 采样, 数据量巨大, 后处理可能会受计算机处理速度限制而滞后几年、几十年, 因此不适合开展常规的脉冲星监测研究。另外脉冲星偏振和高精度到达时间观测需要每隔几分钟进行严格定标, 而对阵列内单个天线进行定标以保证脉冲星信号的相位同步, 目前看来是不现实的。分子谱线观测不需要消色散, 对于时间分辨率要求较低, 但是对于频率分辨率和定标有着很高的要求。

以 LOAFR 为例, 仅就单波束馈源而言, 脉冲星搜寻需要实时处理来自核心叠加阵列的数以千计的波束内采集到的数据, 因而搜寻毫秒脉冲星几乎不可能。如果采用相控阵馈源接收技术, 还需要进行波束合成, 目前的技术水平暂时也不可能满足脉冲星观测对于时间和频率分辨率的需求。另外, 由于阵列望远镜的视场(FoV)很小, 只能对精确测量到位置的脉冲星进行到达时间观测。相比阵列天线而言, 单口径天线具有接收系统简单、灵活的特点, 还可以提供巡天观测所需的相对大视场。

5.2 结论

QTT 的科学目标在低频端(30 cm 以下)以脉冲星观测为主, 高频端(6 mm, 3 mm 波段)以分子谱线探测为主, 13 cm 与 3.6 cm 即 S/X 双频波段主要用于 VLBI。QTT 主体建设将需要大约 5 年时间, 完成后可先行启动低频波段的观测, 尤其是脉冲星和 VLBI 观测。在继续调试改进望远镜面板精度和指向精度以后, 6 mm 与 3 mm 观测可以陆续展开。接收机系统的研制进度可按照天线主体建设分阶段完成。数字终端作为升级换代迅速的设备, 将在制定初期基本方案的基础上, 采用当时最先进可行的技术。

QTT 最大的挑战首先在于整体结构设计, 采用轻型高刚度结构、主动反射面与可调节副反射面是必

然选择.

通过多年的预研, 前述各关键技术已经有所突破, 百米级的全可动射电望远镜建设条件基本成熟. 相关关键技术的研究, 不仅将应用于 110 m 望远镜,

还将促进国内在大口径天线、接收机、低噪温放大器、天线控制与测量等方面的技术水平. 项目团队期望 QTT 将作为中国射电天文研究体系的重要组成部分, 为解决一系列天文学前沿问题提供重要观测手段.

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 Morgan M, Fisher J. Next generation radio astronomy receiver systems. In: Astro 2010 Technology Development White Paper, 2009
- 2 王绥琯, 叶叔华, 苏定强. “建设 100 米口径射电望远镜计划”推荐信. 2008
- 3 Su D Q. Telescopes and astronomy: A 400 year retrospect and future prospects (in Chinese). *Physics*, 2008, 37(12): 836–843 [苏定强. 望远镜和天文学: 400 年的回顾与展望. *物理*, 2008, 37(12): 836–843]
- 4 Orfel A, Morsiani M, Zacchiroli G, et al. An active surface for large reflector antennas. *IEEE*, 2004, 46(4): 11–19
- 5 Hachenberg O, Grahl B H, Wielebinski R. The 100-meter radio telescope at Effelsberg. *Proc IEEE*, 1973, 61: 1288–1295
- 6 Wang C S, Li J J, Zhu M B, et al. Review of surface deformation compensation methods for large reflector antennas (in Chinese). *Electro Mech Eng*, 2013, 29(2): 5–10 [王从思, 李江江, 朱敏波, 等. 大型反射面天线变形补偿技术研究进展. *电子机械工程*, 2013, 29(2): 5–10]
- 7 Zhao W, Ye Q, Feng Z J. Brief analysis of the adjustment technique for active reflector of radio telescope (in Chinese). *Modern Radar*, 2011, 33(5): 85–90 [赵卫, 叶骞, 冯正进. 射电望远镜主动反射面控制技术简析. *现代雷达*, 2011, 33(5): 85–90]
- 8 Nikolic B, Hills R E, Richer J S. Measurement of antenna surfaces from In- and Out-Of-Focus beam maps using astronomical sources. *Astron Astrophys*, 2007, 465(2): 679–683
- 9 Nikolic B, Prestage R M, Balsler D S, et al. Out-of-focus holography at the green bank telescope. *Astron Astrophys*, 2007, 465(2): 685–693
- 10 Wang W, Zhang J T, Chai T Y. A survey of advanced of PID tuning method. *Acta Automatic Sin*, 2000, 26(3): 347–355 [王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述. *自动化学报*, 2000, 26(3): 347–355]
- 11 Olsson R, Kildal P S, Weinreb S. The Eleven antenna: a compact low-profile decade bandwidth dual polarized feed for reflector antennas. *IEEE Trans Anten Propag*, 2006, 54(2): 368–375
- 12 Akgiray A, Weinreb S, Imbriale W. Design and measurements of dual-polarized wideband constant-beamwidth quadruple-ridged flared horn. *IEEE Proc Int Symp Antennas Propag*, 2011, 1135–1138
- 13 Jackson J M, Rathborne J M, Shah R Y, et al. The Boston University-five college radio astronomy observatory Galactic ring survey. *Astrophys J Suppl*, 2006, 163: 145–159
- 14 Schlingman W M, Shirley Y L, Schenk D E, et al. The Bolocam Galactic plane survey. V. HCO+ and N2H+ spectroscopy of 1.1 mm dust continuum sources. *Astrophys J Suppl*, 2011, 195(2): 14–37
- 15 Wielen M, Wyrowski F, Schuller F, et al. Ammonia from cold high-mass clumps discovered in the inner Galactic disk by the ATLASGAL survey. *Astron Astrophys*, 2012, 544: 146–167
- 16 Krips M, Eckart A, Neri R, et al. Molecular gas in nuclei of galaxies (NUGA). III. The Warped LINER NGC 3718. *Astron Astrophys*, 2005, 442: 479–493
- 17 Li H, Chen Y. γ -rays from molecular clouds illuminated by accumulated diffusive protons from supernova remnant W28. *Mon Nat R Astron Soc*, 2010, 409(1): L35–38
- 18 Hobbs G B, Bailes M, Bhat N D R, et al. Gravitational-wave detection using pulsars: Status of the Parkes Pulsar Timing Array project. *Publ Astron Soc Aust*, 2009, 26: 103–109
- 19 Shannon R M, Ravi V, Coles W A, et al. Gravitational-wave limits from pulsar timing constrain supermassive black hole evolution. *Science*, 2013, 342(6156): 334–337
- 20 Lorimer D R. Binary and millisecond pulsars. *Living Rev Relat*, 2008, 11(8): 5–90
- 21 Downs G S. Interplanetary navigation using pulsating radio sources. *NASA Technical Reports*, 1974, N74-34150: 1–12
- 22 Bower R G, Morris S L, Bacon R, et al. Deep SAURON spectral imaging of the diffuse Lyman α halo LAB1 in SSA 22. *Mon Nat R Astron Soc*, 2004, 351: 63–69

- 23 Koopmans L V E. Gravitational imaging of cold dark matter substructures. *Mon Nat R Astron Soc*, 2005, 363: 1136–1144
- 24 Xu J L, Wang J J, Liu X L. Triggered massive and clustered star formation by combined H II regions G38.91-0.44 and G39.30-1.04. *Astron Astrophys*, 2013, 559: 113–118
- 25 Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. The Parkes multi-beam pulsar survey - I. Observing and data analysis systems, discovery and timing of 100 pulsars. *Mon Nat R Astron Soc*, 2001, 328: 17–35

Xinjiang Qitai 110 m radio telescope

WANG Na^{1,2*}

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

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

The 110 m radio telescope (QTT), which is proposed to be built in Xinjiang Qitai, will be in the list of world-leading large scale scientific facilities, becoming the world's largest fully steerable radio telescope. QTT will play an important role in the field of fundamental science, such as gravitational wave detection, black holes, star formation and galaxy origin, and also be applied to deep space explorations, for example, Lunar Exploration Program and Exploration of Mars and Venus. The QTT design has considered various requirements for science goals, and its key technologies include: large-scale antenna structure design, antenna active surface, large inertia mechanism precision servo control technology, broad band feed, low-noise receiver, multi-beam technology, etc. The breakthrough and application of the key technologies will promote the development of engineering technology, including electronic information, precision machining and automatic control, etc. Through international cooperation, the QTT systems will base on self-dependent innovation and adopt related cutting-edge technologies to fulfill its construction.

radio telescopes and instrumentation, heterodyne receivers, astronomical observations, site testing

PACS: 95.55.Jz, 95.85.-e, 95.45.+i

doi: 10.1360/SSPMA2014-00039