



高性能相控阵制冷接收机研究进展

牛晟璞^{1,2}, 伍洋^{1,2}, 邓新坪^{1,2*}

1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081

2. 河北省射电天文技术重点实验室, 石家庄 050081

*联系人, E-mail: xinping.deng@foxmail.com

收稿日期: 2025-02-05; 接受日期: 2025-02-27; 网络出版日期: 2025-04-11

国家重点研发计划(编号: 2022YFC2205303)资助项目

摘要 本文依托于国家重点研发计划, 简述了相控阵馈源(PAF)研究的国内外现状, 指出了相控阵制冷接收机的重要性, 然后课题组以奇台110 m射电望远镜(QTT)为目标, 进行了相控阵制冷接收机初步设计. 本文先将相控阵制冷接收机系统分为了制冷相控阵馈源分系统、射频传输分系统和数字信号处理分系统三个分系统, 然后分别叙述了三个分系统的目前进展和初步设计. 目前初步设计的相控阵制冷接收机系统理论上可满足工作频率0.7–1.8 GHz、口径效率 $\geq 65\%$ (QTT)、瞬时带宽500 MHz、双线极化、系统噪声温度 ≤ 20 K的指标要求.

关键词 相控阵馈源, QTT, 制冷, 射频传输, 数字信号处理

PACS: 95.55.Jz, 84.40.-x, 85.25.-j, 84.30.Ux, 07.57.-c, 84.40.Ba

1 引言

将PAF作为大口径射电望远镜天线馈源的研究始于20世纪末, 相较于传统的多波束馈源, PAF可以形成多个紧密交叠的高性能波束, 具有抗电磁干扰、补偿反射面变形的能力^[1–3], 可以有效扩大望远镜的视场, 提高望远镜的巡天速度. 欧洲的FARADAY项目采用Vivaldi天线阵列, 在2–5 GHz实现2个模拟波束的同时观测. 荷兰ASTRON的APERTIF项目采用Vivaldi天线阵列, 在1–1.75 GHz实现37个数字波束的同时观测, 视场达到 8 deg^2 , 瞬时带宽达到300 MHz, 天线的效率达到75%, 系统噪声达到70 K. 美国BYU与康奈尔大学合作的FLAG项目采用了19元双极化偶极子阵列, 工

作在1.3–1.8 GHz, 采用了制冷LNA, 可同时产生7个瞬时波束, 瞬时带宽达到150 MHz. 加拿大DRAO与Calgary大学合作的AFAD采用41元Vivaldi天线阵列, 工作在1–2 GHz, 系统噪声温度达到50 K, 瞬时带宽达到500 MHz, 具备实时波束合成和天文观测能力. 澳大利亚CSIRO的ASKAP项目采用 94×2 个贴片偶极子阵列, 工作频段为0.7–1.8 GHz, 瞬时带宽达到300 MHz, 口径效率优于70%, 可同时产生36个波束, 在1.4 GHz视场范围达到了 30 deg^2 . CSIRO最新研发的Parkes Cryo-PAF代表了目前国际最高水平, 其采用 98×2 的“Rocket”单元阵列, 工作频段为0.7–1.95 GHz, 可同时产生72个双极化波束, 由于对阵列和LNA进行了制冷, 所以系统噪声温度优于20 K. 国内中国电子科技集团公司第

引用格式: 牛晟璞, 伍洋, 邓新坪. 高性能相控阵制冷接收机研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 269510

Niu S, Wu Y, Deng X. Research progress on design of high-performance phased array cryogenic receiver (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 269510, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0043](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0043)

五十四研究所、中国科学院国家天文台、中国科学院新疆天文台等机构针对SKA, FAST和QTT开展了相控阵馈源的研究工作, 并已取得了一些成果, 但尚未研制出用于天文观测的样机^[4-10].

本文依托于国家重点研发计划“高灵敏度超宽带接收机和宽带相控阵接收机关键技术研究”项目的“高性能相控阵制冷接收机技术研究”课题, 介绍制冷相控阵馈源分系统、射频传输分系统和数字信号处理分系统研究思路和初步研究成果, 用于指导相控阵制冷接收机的研制, 为国内自主研制相控阵制冷接收机, 提升大口径射电望远镜观测能力奠定技术基础.

2 系统组成

高性能相控阵制冷接收机系统由制冷相控阵馈源分系统、射频传输分系统、数字信号处理分系统组成, 其组成框图如图1所示. 制冷相控阵馈源分系统由相控阵馈源、真空窗、低温低噪声放大器和杜瓦设备等组成; 射频传输分系统由滤波器和放大器等组成; 数字信号处理分系统(含软件)由信号采集单元和信号处理单元组成.

3 制冷相控阵馈源分系统

制冷相控阵馈源分系统主要负责接收天线汇聚来的电磁信号, 将信号放大后传输给后面的射频传输分系统. 真空窗和低温低噪声放大器直接采用本项目其他课题的研究成果, 在此不做赘述.

常见的作为相控阵馈源的单元有: 偶极子天线、开口波导、微带天线和Vivaldi天线.

(1) 偶极子天线, 即中心馈电的对称振子. 其结构简单、成本低廉、性能稳定, 但由于采样要求其带宽受限.

(2) 开口波导功率容量大、插损小, 能够在比较高的频段上传输电磁波能量, 具有口面分布容易控制、辐射效率高、结构紧凑、性能稳定可靠、容易实现窄波束和低副瓣或极低副瓣等诸多优点, 缺点同样是带宽有限.

(3) 微带天线是平面结构, 剖面低、易集成、易共形, 能与天线或系统一体化, 减小天线体积, 但微带天线的损耗包括介质损耗、欧姆损耗、辐射损耗等比较

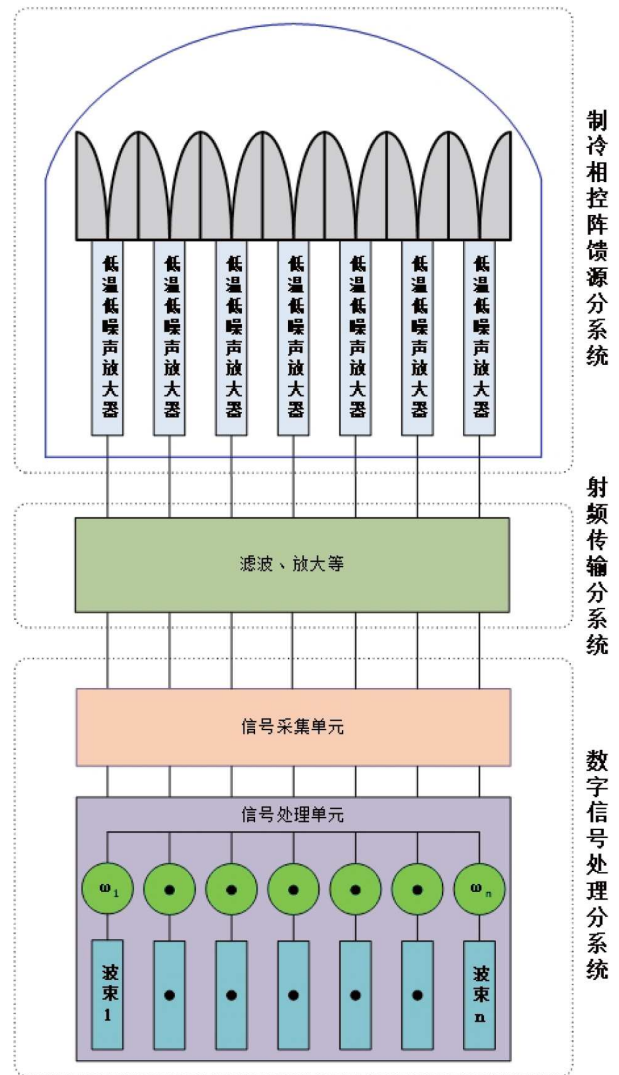


图 1 相控阵制冷接收机系统组成框图

Figure 1 Block diagram of the phased array cryogenic receiver system.

大, 效率较低, 难以实现高灵敏度.

(4) Vivaldi天线是由开槽辐射口逐渐过渡张开端射天线, 是一种线极化、高增益的行波天线. 具有宽带宽、结构简单、可全金属化冷却降温、易于集成等优点. 但局限性较强, 常作为紧耦合阵使用, 导致阵列之间的互耦较强.

(5) Rocket天线从Vivaldi天线变换而来, 由两条插值曲线旋转形成. 其优点在于宽带宽、低损耗、可全金属化冷却降温、采用差分馈电易于集成, 缺点在于加工工艺复杂.

课题研制的相控阵制冷接收机系统工作频段为

0.7–1.8 GHz, 带宽较宽, 并且系统噪声温度要求低于 20 K, 需要对馈源和LNA进行制冷, 所以课题初步采用Vivaldi和Rocket进行优化设计, 如图2所示.

课题组通过对焦面场进行研究^[11–14], 采用效率因子法, 已经将Vivaldi-PAF照射QTT的口径效率在全频带内轴向波束的效率提升到73%以上(轴向波束), 具体参数如表1所示. 后续将继续开展优化设计, 以期达到国际先进水平.

同时课题组调研了相控阵制冷接收机系统杜瓦设备国内外现状, 总结了整体制冷关键技术, 开展了平面型真空窗低温杜瓦设计(图3), 平面型真空窗最外层选用的厚度为0.15 mm的聚酯薄膜(Mylar), 插损约为0.03 dB, 常温下等效噪声温度约为2 K. 加工和试制了杜瓦样机, 并进行了低温实验.

平面型真空窗低温杜瓦在实验室进行了制冷测试. 进行了真空抽取, 以及压缩氦气循环制冷. 最终运行48 h后平面型真空窗低温杜瓦真空度稳定在 2.3×10^{-5} mbar, 馈源阵列处制冷温度为58 K. 后续将继续进行优化设计, 以期达到更低的真空度和温度.

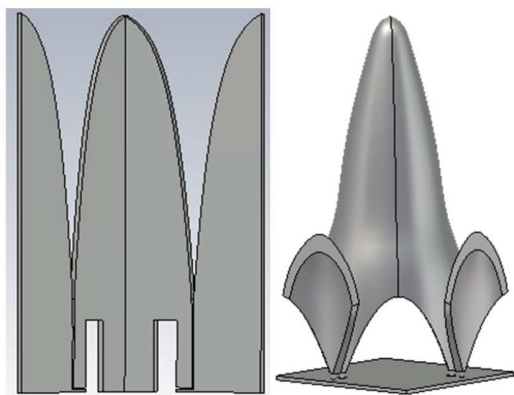


图 2 Vivaldi天线和Rocket天线仿真模型

Figure 2 Simulation model of the Vivaldi antenna and the Rocket antenna.

表 1 Vivaldi-PAF参数

Table 1 Vivaldi-PAF parameters

参数	Vivaldi-PAF
单元尺寸	157 mm × 83 mm × 2.5 mm
单元间距	85 mm
阵列规模	10 × 9
曲线指数	$r = -0.0837$
极化方式	双线极化
电压驻波比	优于1.45

4 射频传输分系统

射频传输分系统主要负责将接收到的制冷相控阵馈源分系统的射频信号调节增益与平坦度到所需范围, 然后传递给后端信号采集单元.

射频传输分系统包含40个通道, 每个通道由普通增益放大器、滤波器、衰减部分以及控制和电源等部分组成. 普通增益放大器主要为了实现链路增益的满足; 滤波器使用的是带通滤波器和低通滤波器, 主要为了滤除带外干扰信号和带内的谐波信号; 衰减部分实现射频信号的增益控制; 控制部分主要为了实现信号接收远程控制指令, 在接收到控制指令后可以对射频传输链路的增益控制、射频频段的选择和电源的电流、电压的检测示警功能. 射频传输分系统链路框图如图4所示. 由于课题所用的LNA研发周期较长, 所以为了便于射频传输分系统直接与相控阵馈源初样集成, 并且可在电磁环境较差的场地进行测试, 在射频传输分系统前加入了前级低噪放模块用于测试. 前级低噪放模块链路示意图如图5所示.

射频传输分系统第一级器件为带通滤波器, 主要是用来滤除0.7–1.8 GHz带外杂波, 并且对2F谐波和1/2F波进行抑制.

第二、四、六、九、十二级器件为普通放大器, 用于放大链路信号.

第三、五、八、十、十三级器件为 π 衰, 可以作为增益调节, 也可以作均衡调节平坦度, 由于信号带宽为0.7–1.8 GHz, 多级放大器和滤波器导致增益平坦度较差, 需要放置均衡器件调整.

第七级器件为数控衰减器, 用于实现链路增益衰减调节, 调节范围是–30–0 dB, 步进0.5 dB.

第十一级器件为选通滤波器组, 采用分段滤波方式, 将0.7–1.8 GHz信号分为两段: 0.7–1.3和1.2–1.8 GHz, 中间交叠100 MHz.

最终射频传输分系统技术指标如下:

- (1) 通道数: 40路;
- (2) 输入频率: 0.7–1.8 GHz;
- (3) 输出频率: 0.7–1.3 GHz, 1.2–1.8 GHz, 两段可选;
- (4) 输入动态范围: –90––60 dBm;
- (5) 增益衰减调节: 范围–30–0 dB, 步进0.5 dB;
- (6) 无衰减增益: ≥ 60 dB;



图 3 平面型真空窗低温杜瓦
Figure 3 Planar vacuum window cryogenic dewar.

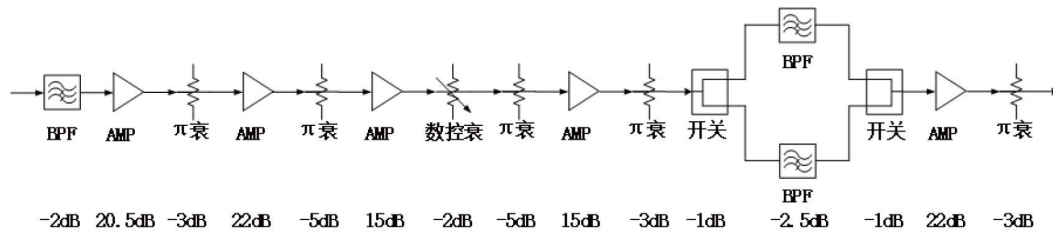


图 4 射频传输系统链路示意图
Figure 4 The link schematic diagram of the RF transmission subsystem.

- (7) 噪声系数: ≤ 5 dB;
- (8) 输出P-1: $\geq +13$ dBm;
- (9) 通道间一致性: 幅度 ± 1.0 dB以内, 相位 $\pm 10^\circ$ 以内;
- (10) 2F谐波和1/2F波抑制: ≥ 30 dBc.

5 数字信号处理分系统

数字信号处理分系统主要由信号采集单元与信号处理单元组成, 系统组成框图如图6所示. 信号采集单

元对信号进行高速采样、通道校准、信道化处理后, 将数字信号通过以太网数据交换设备(网卡与交换机)传递给信号处理单元; 信号处理单元接收各通道数字信号, 然后合成波束, 将合成后的波束数据传送给后端.

5.1 信号采集单元

信号采集单元由5个信号采集模块组成, 每个模块采集8通道射频信号, 并将采集后的数字信号通过以太网输出给信号处理单元, 主要由信号采集板卡及电源

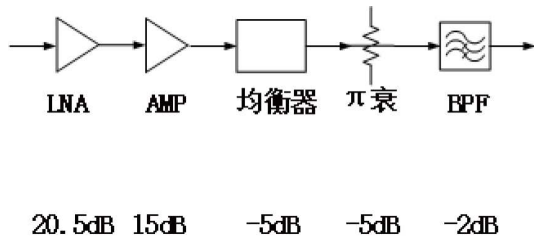


图 5 前端低噪声放模块链路示意图

Figure 5 The link schematic diagram of the front-end LNA module.

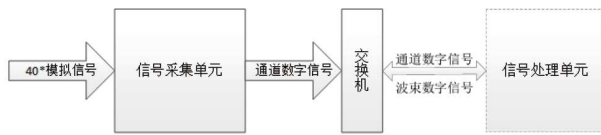


图 6 数字信号处理分系统系统框图

Figure 6 Block diagram of the digital signal processing subsystem.

模块构成, 如图7所示。

信号采集板卡主要完成射频信号同步采集、数字信号预处理、时标信息接收、采样数据光纤发送等功能。板卡采用XILINX的ZYNQ UltraScale + RFSoc系列芯片XCZU48DR-2FFVG1517, 该芯片可分为处理器系统部分Processor System (PS)和可编程逻辑部分Programmable Logic (PL), 其内部在FPGA架构中集成了8路14-bit 5 GSPS ADC和8路14-bit 10 GSPS DAC (可用于信号采集单元测试), 其原理框图如图8所示。

芯片内置了丰富的内存资源, 包括带有ECC的128 KB RAM, 用于存储用户/固件代码。此外, 该芯片还支持32位或64位DDR4/DDR3/DDR3L/LPDDR3内存, 并可选配ECC以提高数据安全性。这种灵活的内存配置方案使得该芯片能够适应不同的应用场景和数据处理需求。该芯片还扩展了对150 Gb/s Interlaken和100 Gb/s以太网(100 G MAC/PCS)的支持, 为Nx100 G交换机和网桥应用提供了简单而可靠的支持。这一特性使得XCZU48DR成为构建高速网络系统的理想选择。

在平台管理方面, 芯片内配备了平台管理处理器(PMP), 用于设备的启动、掉电、上电、复位、时钟门控和电源门控等管理任务。该芯片还提供了本地和全局寄存器, 以支持这些管理操作。同时XCZU48DR还具备高级的安全特性, 如内存保护单元(XMPU)和多级安全性技术, 确保系统的稳定运行和数据安全。

XCZU48DR-2FFVG1517芯片, 在同一块芯片上结合了处理器PS和可编程逻辑PL, Zynq UltraScale +

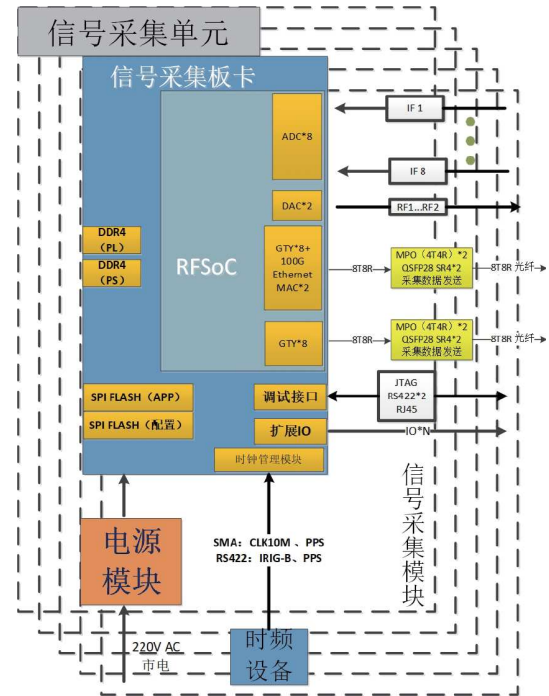


图 7 信号采集单元组成框图

Figure 7 Block diagram of the signal acquisition unit.

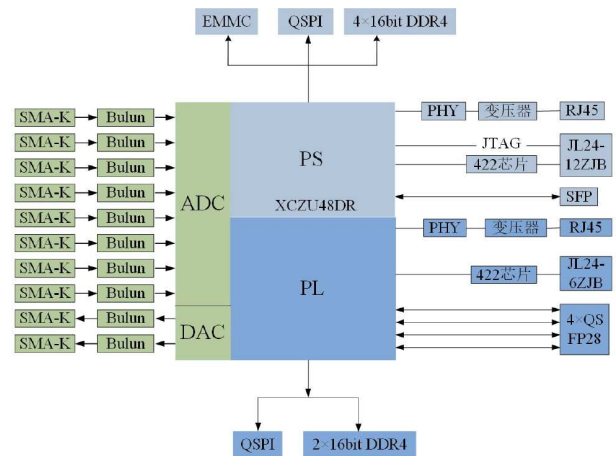


图 8 信号采集板卡原理框图

Figure 8 Principle block diagram of the signal acquisition board.

RFSoc中的PS部分采用Cortex®-A53 64位四核处理器和Cortex-R5双核实时处理器。

电源模块主要完成220 V AC电压至12 V DC交流至直流电压转换、12 V DC至5/3.3/2.5/1.8/0.9 V电压转换、电源保护及滤波等功能。

最终信号采集单元技术指标如下:

(1) 射频输入频带: 0.7–1.8 GHz;

- (2) 射频输入动态: $-60 \sim +10$ dBm;
- (3) 射频输入通道: 40;
- (4) ADC位数: ≥ 14 bit;
- (5) 通道隔离度: ≥ 40 dB;
- (6) 数字输出中频: 可配置;
- (7) 数字输出带宽: 512 MHz;
- (8) 数字输出位数: 16 bit;
- (9) 输出信道带宽: 1 MHz.

5.2 信号处理单元

信号处理单元主要实现相干计算、波束合成计算以及科学数据预处理等, 硬件上主要由两台高性能GPU服务器与一台高性能交换机组成, 其中GPU服务器负责将各通道数字信号合成波束信号, 交换机负责各单元之间的数据交换.

信号采集单元输出数据带宽约为660 Gbps, 合成波束数据带宽约为530 Gbps, 总数据带宽约为1.2 Tbps. 数据交换选择32口100 GbE交换机, 总数据交换带宽为6.4 Tbps, 远高于数字信号处理分系统数据带宽.

GPU服务器端用两块双口100 GbE网卡(每个网口输入输出各100 GbE)接收各通道输出的数字信号并输出合成后的波束信号, 两台服务器总数据带宽为1.6 Tbps, 满足数据带宽要求.

在信号采集单元与信号处理单元之间交换数据时, 信号采集单元利用100 GbE光口输出数据, GPU服务器上的CPU负责从网卡实时采集数据, 并将数据放入主机内存环形存储空间. 主机内存环形存储空间含有多多个大小一致的子空间, 在波束合成系统运行过程中, CPU打开当前子空间并写满, 然后关闭该子空间让其可被数据处理模块使用, CPU重复上述过程直至波束合成系统关闭.

数据处理分为相干矩阵计算以及波束合成计算, 前者计算信道内各接收单元之间的相干矩阵, 该矩阵是计算波束合成权值的基础; 后者利用权值对信道内各接收单元输出信号进行加权处理, 并求和以形成最终的波束输出. 相干矩阵计算与波束加权计算的核心为矩阵相乘, 基于英伟达发布的cuBLAS库来实现.

最终信号处理单元技术指标如下:

- (1) 数据接收带宽: 512 MHz;
- (2) GPU浮点位宽: 32;
- (3) 合成波束数量: 16 (40路信号).

6 性能分析

6.1 动态范围

样机研制出来后计划在SKA-P天线上进行测试, L波段常见的流量密度较大的射电源为仙后座, 在1.67 GHz的流量密度达到1830 Jy. SKA的天线口径为15 m, 假设天线效率为50%, 则PAF口面的电磁信号能量为 -90.5 dBm, 经过LNA (增益: 30 dB)放大后的信号能量为 -60.5 dBm, 经过射频传输分系统(增益60 dB, 可调衰减30 dB)后的信号能量范围为 $-30.5 \sim -0.5$ dBm, 上述各分系统动态范围均满足要求.

6.2 工作频率、口径效率和极化方式

课题组研制的双线极化Vivaldi-PAF在0.7–1.8 GHz全频带内有源驻波在1.45以下, 口径效率(QTT)超过73%, 满足课题指标要求.

6.3 瞬时带宽

数字信号处理分系统采用的RFsoc芯片内部在FPGA架构中集成了8路14-bit 5 GSPS ADC, ADC主要技术指标如下:

- (1) 数据量化位宽14 bit;
- (2) 采样率: 5 GSPS;
- (3) 最大允许输入功率: 14.6 dBm;
- (4) 典型SFDR值: ≥ 65 dBc;
- (5) 输入最大幅度典型值: 1 dBm;
- (6) 全功率 -3 dB模拟带宽可达6 GHz.

所选芯片采样率达到5 GSPS, 瞬时带宽最高可达2.5 GHz, 满足课题500 MHz瞬时带宽的指标要求.

6.4 接收机系统噪声温度

相控阵制冷接收机系统的噪声温度主要是各器件产生的热噪声, 各器件的噪声温度如表2所示. 可以看出相控阵制冷接收机系统噪声温度约为16.96 K, 满足

表 2 器件噪声温度

Table 2 Noise temperature of each device

器件	噪声系数(dB)	环境温度(K)	噪声温度(K)
真空窗	0.03	300	2.08
阵列	0.5	60	7.37
LNA	1.3	20	6.78
射频链路	5	300	0.73

课题指标需求.

7 结论

本文将相控阵制冷接收机系统分为三个子系统, 并对三个子系统进行了分析, 简述了初步的研究进展. 目前性能最优的Vivaldi-PAF照射QTT的天线口径效率在全频段内已优于73%, 满足课题工作频率0.7–1.8 GHz、口径效率 $\geq 65\%$ (QTT)和双线极化的指标要求. 通过杜瓦对阵列和LNA进行制冷, 使整个系

统的噪声温度优于17 K, 满足课题系统噪声温度 ≤ 20 K的指标要求. 数字信号处理分系统采用的RFSoc芯片瞬时带宽可达2.5 GHz, 满足课题瞬时带宽500 MHz的指标要求. 后续将研制相控阵馈源阵列初样、射频传输分系统样机和数字信号处理分系统样机, 并进行集成测试, 然后在SKA天线上进行观测. 还将继续进行相控阵馈源阵列优化设计、杜瓦设备优化、系统集成研究、系统校准方法研究、工程化系统设计等, 以期系统获得更高的灵敏度, 为国内自主研发相控阵制冷接收机样机奠定基础.

参考文献

- 1 Wu Y. Research on Phased Array Feed Technology for Radio Telescope Antennas (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Xi'an: Xidian University, 2013 [伍洋. 射电望远镜天线相控阵馈源技术研究. 博士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2013]
- 2 Niu S P, Kong D Q, Wu Y. Structural disturbance compensation for radio telescopes based on phased array feeds (in Chinese). In: Proceedings of the 18th National Conference on Radio Wave Propagation. Beijing: China Institute of Electronics, 2023. 368–371 [牛晟璞, 孔德庆, 伍洋. 基于相控阵馈源的射电望远镜结构扰动补偿研究. 见: 中国电子学会电波传播分会, 第十八届全国电波传播年会. 北京: 中国电子学会, 2023. 368–371]
- 3 Han Y B, Tran V, Tang L L, et al. Design of phased array feed for the five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (in Chinese). Chin J Radio Sci, 2016, 31: 219–227 [韩玉兵, Tran Vanha, 汤蕾蕾, 等. 五百米口径球面射电望远镜的相控阵馈源设计. 电波科学学报, 2016, 31: 219–227]
- 4 Chippendale A P, Beresford R J, Deng X, et al. Testing a modified ASKAP Mark II phased array feed on the 64 m Parkes radio telescope. In: Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Cairns, 2016. 909–912
- 5 Harrison S T, Hovey G J, Veidt B, et al. A digital beamformer for the advanced focal array demonstrator (AFAD). Proc SPIE, 2018, 10708
- 6 Chen K, Warnick K F. Optimizing the design of phased array feeds for survey speed. Electron Lett, 2020, 56: 7–9
- 7 Orrú E, Adams E A K, Bouwhuis M, et al. Apertif: Lessons learned operating a Phased Array Feed array. In: Proceedings of the 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS). Rome: IEEE, 2021
- 8 Pupillo G, Navarrini A, Melis A, et al. Preliminary characterization of the digitally formed beams of PHAROS2 phased array feed. In: Proceedings of the 2020 50th European Microwave Conference (EuMC). Utrecht: IEEE, 2021. 12–14
- 9 Dunning A, Barker S, Carter N, et al. A wideband cryogenic phased array receiver for radio astronomy. In: Proceedings of the 2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI). Portland: IEEE, 2023
- 10 Ma J, Wu Y, Xiao S, et al. Design of the cryogenic system of the wideband phased array feed for QTT. Res Astron Astrophys, 2021, 21: 88
- 11 Wu Y, Du B, Liu X M, et al. Focal field analysis and phased array feed design (in Chinese). J Electron Inform Technol, 2013, 35: 1236–1240 [伍洋, 杜彪, 刘肖萌, 等. 焦面场分析与相控阵馈源设计. 电子与信息学报, 2013, 35: 1236–1240]
- 12 Duan X F, Wang K, Ning Y W, et al. Analysis and research on the focal field of radio telescopes (in Chinese). J Microw, 2021, (S1): 97–100 [段雪峰, 王凯, 宁云炜, 等. 射电望远镜焦面场分析研究. 微波学报, 2021, (S1): 97–100]
- 13 Tian J Y, Du B, Wu Y, et al. Study on the focal field sampling and design of phased array feed (in Chinese). Chin J Radio Sci, 2022, 37: 58–66 [田佳桢, 杜彪, 伍洋, 等. 反射面天线焦面场采样研究与相控阵馈源设计. 电波科学学报, 2022, 37: 58–66]
- 14 Shi Q, Du B, Tian J Y, et al. A phased array feed design based on edge beam focal field sampling (in Chinese). In: Proceedings of the National Antenna Conference. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2023. 682–684 [石晴, 杜彪, 田佳桢, 等. 一种基于边缘波束焦面场采样的相控阵馈源设计. 见: 全国天线年会. 西安: 西安交通大学出版社, 2023. 682–684]

Research progress on design of high-performance phased array cryogenic receiver

NIU Shengpu^{1,2}, WU Yang^{1,2} & DENG Xinpeng^{1,2*}

¹ The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

² Hebei Key Laboratory of Radio Astronomy Technology, Shijiazhuang 050081, China

*Corresponding author (email: xinpeng.deng@foxmail.com)

This article is based on the National Key Research and Development Program. It provides a comprehensive overview of the current status of phased array feed (PAF) research both domestically and internationally, highlighting the significance of phased array cryogenic receivers. The research team aims to design a cryogenic receiver for the QiTai 110-meter Radio Telescope (QTT). The proposed system is divided into three subsystems: the cryogenic phased array feed subsystem, the RF transmission subsystem, and the digital signal processing subsystem. This paper details the preliminary design and progress of each subsystem. The theoretical analysis demonstrates that the designed receiver meets the target specifications, including an operating frequency of 0.7–1.8 GHz, an aperture efficiency $\geq 65\%$ (QTT), an instantaneous bandwidth of 500 MHz, dual linear polarization, and a system noise temperature ≤ 20 K.

phased array feed, QTT, cryogenic, RF transmission, digital signal processing

PACS: 95.55.Jz, 84.40.-x, 85.25.-j, 84.30.Ux, 07.57.-c, 84.40.Ba

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0043](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0043)