



# 大口径射电望远镜超宽带接收机技术发展

陈卯蒸<sup>1,2</sup>, 刘奇<sup>1,2\*</sup>, 马军<sup>1,2</sup>, 王娜<sup>1,2</sup>

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: liuqi@xao.ac.cn

收稿日期: 2016-12-03; 接受日期: 2017-02-21; 网络出版日期: 2017-04-06

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)和国家自然科学基金(编号: U1431230, 11473061)资助

**摘要** 新疆奇台拟建的110 m全可动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, 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, 如探月工程与火星和金星探测. 满足众多科学需求需装备超宽带、多波束、高灵敏度接收机系统, 而大口径射电望远镜接收机技术面临众多挑战. 本文论述了国内外射电天文领域大口径射电望远镜接收机技术发展, 包含超宽带馈源/极化器、超宽带低噪声放大器、多波束接收机技术的发展与现状, 分析了接收机研制过程中的难点与挑战. 基于QTT科学目标和技术进展, 给出了初期的接收机系统配置方案, 分析了接收机的馈电形式、关键器件研制与选型、关键问题与难点.

**关键词** 射电望远镜, 超宽带, 接收机技术, 多波束技术

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

## 1 引言

射电天文经过70多年的发展历程, 其灵敏度和观测效率取得了跨越式的进步, 但现有技术只能在同一时间、有限的频率范围内观测极小的天区. 未来的射电天文观测需要空前的高灵敏度和更高效的大天区巡天能力. 美国国家射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)对下一代射电天文接收机系统的发展方向给出了明确的目标: 宽带、多波束. 增加接收机带宽可实现更宽的频率覆盖<sup>[1,2]</sup>, 提高系统灵敏度和观测效率; 多波束接收机可大大提高成像效率, 使得大样本、大尺度、长时间银河系巡天观

测能够有效实施<sup>[3,4]</sup>.

110 m全可动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)的首要任务是提供优良的天文学基础科学研究平台, 其特点是高灵敏度、大天区和宽频覆盖, 与国内现有的射电望远镜形成很强的互补. QTT科学目标包括: 脉冲星观测研究、射电分子谱线观测研究、高精度VLBI (Very Long Baseline Interferometer, VLBI)天体测量、天文地球动力学和空间VLBI研究、活动星系核、特殊射电源精细结构以及脉泽研究, 巡天发现更多的未知天体、航天器VLBI深空测轨应用、脉冲星深空自主导航应用研究和脉冲星时间基准等<sup>[5]</sup>.

QTT众多科学需求需装备多台超宽带、多波束

**引用格式:** 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  
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, doi: 10.1360/SSPMA2016-00505

接收机, 而不可避免地面临众多技术挑战. 超宽带接收机通常由大量的微波部件构成, 并通过抽真空和制冷在低温环境下工作; 其技术瓶颈主要是馈源/极化器OMT (Ortho-mode Transducer, OMT)、低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)、接收机系统集成和组装等.

宽带馈源/极化器技术: (1) 仿真设计阶段对馈源/极化器各个参数进行优化和均衡是器件研发需要解决的关键问题; (2) 低温环境下(20 K) OMT参数指标的精确测量是器件研制环节的难点; (3) 毫米波段的微波波导器件物理尺寸较小, 如何设计分解, 尽可能减小装配误差, 同时又具备良好的可加工性, 也是OMT设计要解决的关键问题.

超宽带低噪声放大器技术: (1) 基于理论分析和实测建立MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) LNA低温模型是器件研制的关键; (2) 毫米波段信号波长与电路尺寸相当, 电路设计与优化是MMIC放大器研制的难点; (3) 低温环境下MMIC晶片测试和封装测试是MMIC开发的关键环节.

系统的集成和组装: 厘米波和毫米波(3 mm以上频段)的接收机均为外差式, 为实现频率调谐和选择, 多采用多级混频, 但每一级混频都会产生变频损耗和高次谐波, 需用滤波器滤除无用信号, 并匹配合适的放大器补偿变频损耗及滤波器、传输线等引入的插入损耗, 还要解决各器件之间的匹配等诸多棘手的问题. 其次, 射频和微波零部件趋向小型化, 但是整个接收机尺寸仍然很大, 尤其多波束系统. 所以, 研发造价更低、更稳定、更紧凑、更可靠、可灵活配置、重量轻并具备宽带数据传输的高性能接收机系统将是射电天文技术的重大挑战.

综上所述, QTT接收机系统研制需综合考虑科学需求和技术可行性. 本文将重点论述超宽带馈源和极化器、宽带低噪声放大器、多波束接收机等技术发展及现状. 结合QTT科学需求及技术现状, 给出QTT接收机系统初步设计方案.

## 2 超宽带接收机技术

### 2.1 超宽带馈源和极化器

馈源技术发展源于科学需求推动, 即追求连续的带宽覆盖, 要求馈源拥有更宽的带宽, 且保障馈源反

射损耗、交叉极化、半波束宽度、旁瓣电平等性能指标, 从而提高射电天文观测效率.

喇叭馈源80年代应用非常普遍, 尤其是波纹喇叭馈源, 其具有非常好的性能, 如主瓣对称性和交叉极化, 在反射面天线厘米波段和毫米波段应用非常广泛, 工作带宽可达到2倍频程<sup>[6,7]</sup>. 波纹喇叭成本高, 且非常重, 但是选材容易, 而毫米波波纹喇叭馈源难点为加工和安装精度.

瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers University of Technology)于2005年开始研制超宽带Eleven馈源(由Kildal提出), 如图1所示. 此馈源具有10倍频程, 可用于单反射面或双反射面天线. Eleven馈源对于射电天文应用具有很好的特性, 在制冷环境下, 其工作带宽2–14 GHz, 孔径效率66%, 反射损耗小于–5 dB, 整个带宽内增益11 dBi, 且具有固定的相位中心<sup>[8,9]</sup>. 麻省理工学院海斯塔克天文台为12 m望远镜设计了Eleven馈源, 其工作带宽为2–12 GHz, 并对反射损耗进行优化, 其性能指标优于–10 dB, 并在制冷环境下进行实测, 测试结果表明Eleven馈源具有较高的孔径效率<sup>[10]</sup>.

SKA (Square Kilometer Array)为观测频段1(0.35–1.05 GHz)设计了Eleven馈源<sup>[11,12]</sup>, 如图2所示, 此馈源采用为双极化, 带宽内反射系数低于–12.5 dB, 孔径效率高于60%, 交叉极化电平低于–15 dB, 插入损耗0.5 dB.

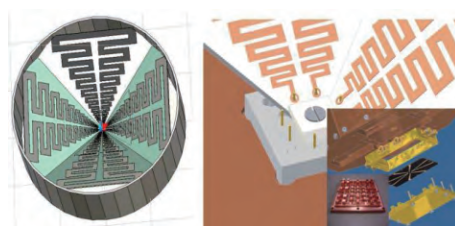


图1 (网络版彩图)Eleven馈源结构<sup>[10]</sup>

Figure 1 (Color online) The structure of the Eleven feed [10].

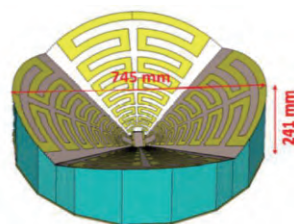


图2 (网络版彩图)SKA Eleven 馈源<sup>[12]</sup>

Figure 2 (Color online) Eleven feed for SKA [12].

馈源性能指标具有低的反射系数、高的孔径效率、低交叉极化电平,且插入损耗小,满足超宽带工作要求.

ETS-Lindgren研制的Lindgren四脊(Quad-Ridge)馈源,工作带宽400 MHz–6 GHz,增益5–12 dBi,交叉极化隔离好于25 dB.但是四脊喇叭馈源的低频性能相对较差.为提高低频工作性能,澳大利亚CSIRO Astronomy and Space Science技术人员<sup>[13]</sup>设计了介质加载四脊喇叭馈源,如图3所示.采用介质加载方法提高馈源的低频的性能指标,其工作带宽0.7–4.2 GHz,带宽内孔径效率 $0.70\pm0.05$ ,反射损耗大于14 dB.

对称周期天线并没有普遍应用于反射面馈源,原因是其相位中心随频率变化较大<sup>[14]</sup>. Allen望远镜阵(Allen Telescope Array, ATA)的超宽带馈源,如图4所示.开发人员通过性能优化,相位中心变化达到可接受水平,其方案采用锥形微带巴伦结构<sup>[15]</sup>,实现240/50  $\Omega$ 转换,工作带宽1–10 GHz,反射损耗好于25 dB,插入损耗0.3–0.4 dB.

随着馈源技术的发展,馈源形式不断增多,不同馈源方式都有各自的难易特点,馈源带宽性能并不受限于喇叭本身,而是OMT. OMT类型较多,应用于射电天文领域的OMT主要有耦合波导OMT, Finline OMT和加

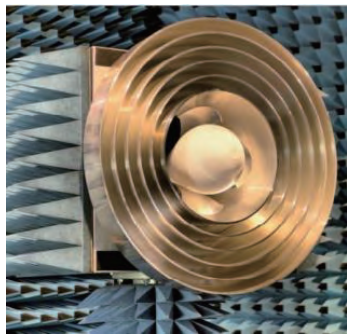


图3 (网络版彩图)介质加载四脊喇叭馈源<sup>[13]</sup>  
Figure 3 (Color online) Dielectrically loaded quad-ridge feed [13].

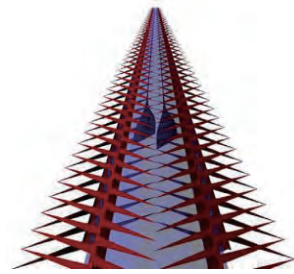


图4 (网络版彩图)ATA 馈源<sup>[14]</sup>  
Figure 4 (Color online) ATA feed [14].

脊波导OMT. OMT的研究在保证工作带宽内性能的同时,更重要的是提高OMT的易加工性,减小器件尺寸,不同形式OMT的优缺点见表1.

耦合波导极化器基于耦合波导设计,波导带宽内性能优异,而且具有很好的插入损耗和交叉极化隔离性能<sup>[16,17]</sup>. 耦合波导主要有Boifot Junction (图5(a))<sup>[18]</sup>和Turnstile Junction (图5(b))<sup>[19]</sup>两种形式. Boifot Junction型极化器是由Boifot等人<sup>[20]</sup>在1990年提出. 美国NRAO EVLA (Expended Very Large Array, EVLA)接收机Ku (12–18 GHz), K (18–26.5 GHz), Ka (26.5–40 GHz) 采用Boifot Junction型极化器<sup>[20]</sup>.

2006年, Navarrini等人<sup>[21]</sup>设计出了K (18–26 GHz)波段的Turnstile极化器,回波损耗大于19 dB,插入损耗小于0.15 dB,隔离度小于–48 dB. NRAO技术人员<sup>[22]</sup>于2011年设计了X波段(8–12 GHz)Turnstile OMT,通过金属调制模块提高匹配特性,回波损耗大于19 dB,插入损耗小于0.15 dB,隔离度大于50 dB.

由于射电天文接收机通常采用双极化,故加脊波导OMT一般选用四脊形式,如图6所示. 一直以来,有众多国外学者致力于加脊波导极化器的研究<sup>[23–24]</sup>. 为实现宽带连续覆盖,美国NRAO VLA (Very Large Array)在L, S, C频段采用四脊OMT和移相电桥将线极化合成圆极化输出,带宽可以达到一个倍频程,即相对带宽

表1 不同形式OMT性能对比  
Table 1 Comparison of different types OMT

形式	优点	缺点	性能
Turnstile 型	工作频带宽,带内性能优越	加工复杂,装配误差影响较大	工作带宽 $\geq 50\%$ , 插损: 0.15 dB
Boifot 型	工作频带较宽,带内性能优越	加工复杂,加工误差影响较大	工作带宽 $\geq 40\%$ , 插损 $< 0.3$ dB
脊波导 OMT	工作频带较宽,带内性能优越	加工复杂,加工误差影响较大	工作带宽 $\geq 100\%$ , 插损: 0.2–0.4dB
Finline 型	工作频带较宽	加工相对简单带	工作带宽 $\geq 40\%$ , 插损: 0.2–0.3 dB



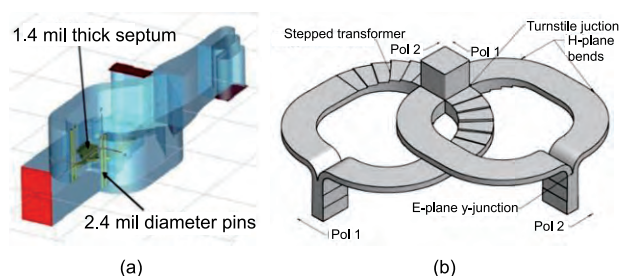


图5 (网络版彩图)耦合波导OMT. (a) Boifot型OMT<sup>[18]</sup>; (b) Turnstile型OMT<sup>[19]</sup>

Figure 5 (Color online) Coupled waveguide OMT. (a) Boifot OMT [18]; (b) Turnstile OMT [19].

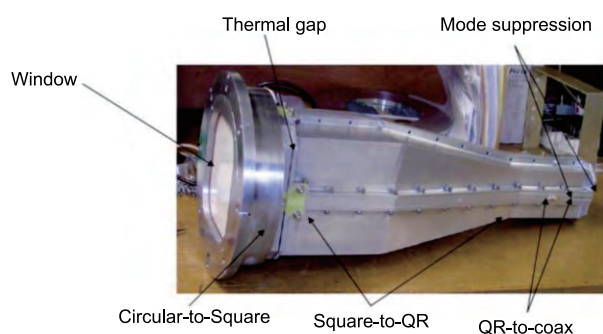


图6 (网络版彩图)四脊正交模转换器<sup>[25]</sup>

Figure 6 (Color online) Quad-ridge OMT components [25].

100%<sup>[25]</sup>. 其中, L波段OMT在1–2 GHz带宽内反射损耗优于–18.8 dB, 交叉极化优于35.7 dB, 插入损耗小于0.2 dB; S波段(2–4 GHz)插入损耗小于0.2 dB, 反射损耗大于20 dB; C波段(4–8 GHz)插入损耗小于0.4 dB, 反射损耗优于–16 dB.

鳍线型(Fineline型) OMT由Robertson<sup>[26]</sup>在1956年提出, 是通过在方波导或圆波导内加入两个截然相反的薄锥形金属鳍片构成的. 后来, Chattopadhyay等人<sup>[27]</sup>将该种极化器成功应用到了毫米波领域. Skinner等人<sup>[28]</sup>在此基础上对其进行了改进, 将主臂也弯向侧臂一侧方便两输出端口在同侧输出, 并在主臂鳍片末端接上脊波导来进一步优化主臂的宽带输出匹配, 实现了在2.2个倍频程内回波损耗大于15 dB. 鳍线型OMT具有加工简单的优点, 但是其非对称结构, 难以抑制TE<sub>11</sub>/TM<sub>11</sub>高次模, 若在鳍片末端加入阻抗片结构来抑制高次模以优化宽带特性, 将增加器件的插入损耗, 若缩短鳍的长度, 则带宽难以保证.

宽带馈源/极化器的选择追求更宽的频率覆盖, 同时还必须考虑回波损耗、插入损耗、隔离度等指标.

仿真设计阶段需要对整个频带内馈源的各个参数进行优化, 更重要的是宽带和其他性能指标之间的均衡. 对于毫米波应用, 简化馈源极化器结构形式, 保证性能的同时, 加工安装精度成为馈源/极化器应用的关键.

## 2.2 超宽带、低噪声放大器

低噪声放大器是射电天文接收机的核心器件之一. 而低噪声放大器的设计具有很大挑战, 需要满足低温环境下超宽带、多波束接收机技术性能要求, 如低温环境下的宽带匹配、稳定性问题<sup>[29]</sup>.

20世纪70年代, 低噪声接收系统得益于固态微波激光器、制冷低噪声放大器、肖特基二极管混频等技术的发展, 成功应用于深空探测和射电天文领域. 1970年, Lorigou等人<sup>[30]</sup>对GaAs FET's (Field Effect Transistors) 低温环境下进行测试, 发现1 GHz频点77 K环境下噪声温度从360 K变化至120 K. 两年后, 文献[31]测试了1.5 GHz频点77 K环境下噪声温度为93 K. 1976年Liechti<sup>[32]</sup>在12 GHz频点90 K环境下测得器件噪声温度为60 K, 并在60 K环境下对三阶放大器进行测试, 增益为31 dB, 噪声温度130 K. 随后Weinreb等人<sup>[33,34]</sup>对FET的低噪声性能进行更多的测试研究, 确定GaAs FET's的噪声性能适合应用于射电天文L波段和C波段. 1980年, 20 K环境下5 GHz频点处噪声温度低至20 K, 1982年, 20 K环境下, 1.4 GHz频点处噪声温度低至7 K<sup>[35]</sup>. 1984年, NRAO技术人员Pospieszalski<sup>[36]</sup>研究了低温环境下X波段不同商用FET's的噪声性能, 封装后的商用FET's (Fujisutsu FSC10FA) 14 K环境下8.4 GHz处噪声温度为20 K.

1980年, 基于AlGaAs/GaAs HFET's (High Field-Effect Transistors) 第一次在实验室验证成功<sup>[37]</sup>. 1985年, 康奈尔大学开发了栅极长度0.25  $\mu\text{m}$ 的HFET, 并在低温环境性进行测试, 开发完成后在NRAO进行应用<sup>[38]</sup>. 不久之后, NRAO CDL (Central Development Laboratory), GE (General Electric)和Jet Propulsion实验室联合针对低温HFET's放大器进行研究, 并装备于NRAO VLA 低噪声接收机, 用于监测航天器位置, 此项目非常成功, 实现8.4 GHz频率噪声温度6 K<sup>[39–41]</sup>. 80年代末, 两项技术获得重要突破: 其一, 1985年引入Pseudomorphic HFET's概念; 其二, 0.1  $\mu\text{m}$ 栅极长度制作工艺得以实现<sup>[37]</sup>. 0.1  $\mu\text{m}$ 栅极长度 Pseudomorphic HFET's实现低噪声放大器工作频率高至95 GHz, 尽管W波段的低温

应用效果差于超导混频技术<sup>[37]</sup>, 但是此技术在VLBA (Very Long Baseline Array) 40–45 GHz低温接收机得到应用<sup>[37,42]</sup>. 1991年NRAO技术人员开发的低噪声放大器, 40–45 GHz频段增益为32–35 dB, 噪声温度小于25 K. 1991年之后, AlGaAs/InGaAs/GaAs HFET's代替了传统的AlGaAs/GaAs HFET's, 但是这种器件的缺点为室温环境下相同的器件低温环境下噪声温度一致性较差.

AllnAs/InGaAs/InP HFET's具有优异的性能, 尤其是InP HFET's. 1989年, Hughes Research实验室提出T型0.1  $\mu\text{m}$ 栅极和AlInAs/InGaAs/InP 晶体结构融合技术<sup>[43]</sup>, 提高了室温环境下器件噪声性能, 实现63 GHz频率噪声温度67 K. 1991年, NRAO技术人员<sup>[37]</sup>预测了InP HFET's噪声性能随温度变化. 对于InP HFET's, 室温环境下栅极漏电流为几个 $\mu\text{A}$ , 而低温环境下将减少一个量级, 但是如果栅极电流在制冷环境下为几个 $\mu\text{A}$ , 将极大影响低温噪声性能. 1995年之后, 低噪声器件没有显著突破, 但是InP HFET's技术已经趋于成熟, 可以研制出非常优异的低噪声放大器, 并应用于射电天文领域, 如美国NRAO VLA, GBT (Green Bank Telescope), 尤其是Ku, Ka和Q波段, 大大提高射电望远镜接收机灵敏度. W波段以下的制冷接收机应用InP HFET's获得了极低的噪声性能, 对于W波段, HFET's与超导混频器存在竞争, 而选择哪种技术并非只考虑噪声温度, 也需要考虑其他性能; 而高于W波段, 超导混频器的噪声性能好于InP HFET's.

进入20世纪90年代, 随着微电子技术和低噪声半导体材料研究的进步, 基于MMIC的低噪声放大器性能不断提升. MMIC LNA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, 是射电天文接收机的必然选择. 近年来, MMIC LNA技术进展及指标见表2<sup>[44–51]</sup>.

欧美相关研究机构在MMIC技术方面一直处于国际领先水平, 近年来针对射电天文应用对低温MMIC进行了器件模型建立、电路设计等方面的研究取得了很大的进展, 其产品覆盖从射频微波到毫米波波段. 其中, 美国加州理工学院在SiGe BiCMOS, GaAs HEMT, InP HEMT的器件建模、电路设计方面进行了深入的研究<sup>[52]</sup>. 瑞典Gotmic AB (Chalmers University of Technology, Microwave Electronics Laboratory创立) 致力于高频(50–120 GHz)商用MMIC低噪声放大器芯片的开发. 德国IAF (Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik)近年来运用50 nm栅极长度mHEMT (Metamorphic High Electron Mobility Transistor)技术工艺, 完成了54, 89, 118, 183, 229, 243 GHz毫米波低温超低噪声放大器的开发, 并应用于ESA (European Space Agency, ESA)气象卫星. 法国OMMIC近年来针对射电天文应用对低温MMIC进行了器件模型建立、电路设计等方面的研究, 取得了很大的进展, 其产品覆盖从射频微波到毫米波波段(0.5–160 GHz), 如运用70 nm mHEMT技术完成75–115 GHz MMIC 4阶低噪声放大器芯片的开发, 尺寸2000  $\mu\text{m}$ ×3000  $\mu\text{m}$ , 90 GHz频点噪声温度2.8 dB, 增益为23 dB, 并应用于航空及军事领域.

射电天文接收机为了获得极低的噪声温度, 对低噪声放大器等微波器件进行低温制冷, 而低温下微波固态器件的特性参数会发生变化, 晶体管的工作点也会变化. 设计低温MMIC放大器基于理论分析和实测, 并建立相匹配的低温模型. 另外, 毫米波段信号波长

表2 MMIC低噪声放大器技术进展  
Table 2 Progress of MMIC LNA

Ref.	Process	Type	Fre (GHz)	Gain (dB)	Te@Tamb (K)
[44]	0.1 $\mu\text{m}$ InP HEMT	3-stages MMIC	1–11	33.4	3.9@4.1
[45]	0.1 $\mu\text{m}$ InP HEMT	3-stages MMIC	4–12	37	3.9@12
[46]	0.1 $\mu\text{m}$ InP	3-stages MMIC	0.5–13	38	44@12
[47]	0.1 $\mu\text{m}$ InP	3-stages MMIC	26–40	23	15.5@12
[48]	InP	4-stages MMIC	26–36	42	20@15
[49]	0.1 $\mu\text{m}$ InP	3-stages MMIC	25–34	24.2	15.2@15
[50]	35nm InP	4-stages MMIC	70–95	27–31	20–30@27
[51]	35nm InP	3-stages MMIC	75–116	20–29	20–29@27

与电路尺寸相当, 引线、接地、反馈电路等对电路性能的影响较大, 为低温MMIC放大器设计的难点, 须进行准确评估, 并在设计中统筹考虑. 低温环境下MMIC晶片测试和封装测试也是MMIC开发的关键环节, 各种参数的准确测量为低噪声放大器的进一步优化设计提供依据.

### 3 多波束接收机技术

#### 3.1 多波束接收发展

传统的喇叭阵列是将馈源喇叭集中排列在一起, 从而增大深空观测区域的像素, 提高观测效率. 传统多波束接收机主要应用于厘米波段和毫米波段. 典型的馈源喇叭阵列在焦平面的像素焦距大约为2.5个波束宽度.

厘米波段第一台实用的多束接收系统于1997年初安装在澳大利亚的Parkes 64 m望远镜上, 即L波段13波束接收机系统<sup>[53-55]</sup>. 开发人员选择圆喇叭馈源, 在于其方向图具有很好的对称性, 且低溢出、交叉极化性能较好; 该接收机每个波束为正交线极化, 角分辨率为14.4'. 瞬时带宽由相关器决定, 为64 MHz, 频率精度为62.5 KHz (13 km/s). 运用此多波束接收机发现了大量脉冲星, 包括能够快速检验相对论的双脉冲星系统、一种间隙脉冲星和磁星的射电辐射, 使得引力论等物理研究取得突破进展. 此外, L波段多波束接收机的研制和应用包括Effelsberg 100 m 7波束接收机<sup>[56]</sup>, 英国76 m 4波束接收机. 2007年, K波段7波束喇叭馈源阵列接收机装备于GBT 100 m射电望远镜, 主要用于谱线观测及VLBI联测.

QUIET (The Q/U Imaging Experiment, QUIET)落于智利海拔5080 m的Chajnantor高原, 用于测量宇宙背景辐射的偏振<sup>[57-60]</sup>. 接收机系统由90个95 GHz接收机和19个44 GHz接收机组成. 为获得需求的灵敏度, QUIET在组装及小型化方面获得突破, 偏振模块集成于芯片内, 并且可以大规模生产, 如95 GHz模块尺寸为3.2 cm×2.9 cm, 44 GHz模块尺寸为5.1 cm×5.1 cm. 模块由低噪声放大器、相移器、检波二极管等组成, 如图7所示.

位于美国夏威夷的JCMT (James Clerk Maxwell Telescope)望远镜使用连续谱阵列接收机SCUBA (Sub-

millimetre Common-User Bolometer Array)所发现的亚毫米波星系也验证了多波束接收机的观测效率<sup>[61,62]</sup>. 美国GBT 100 m射电望远镜装备了4 mm双波束接收系统, 工作带宽68–92 GHz, 系统温度100 K, 波束隔离4.7", 极化方式为双线极化, 可以选择圆极化用于VLBI观测.

国内, 中国紫金山天文台德林哈13.7 m射电望远镜装备了9波束接收机系统<sup>[63,64]</sup>, 工作频率85–115 GHz, 系统噪声温度60 K. 此接收机采用超导混频技术, 结构紧凑, 如图8所示. 多波束接收机系统装备后, 用于分子谱线观测, 大大提高了巡天效率.

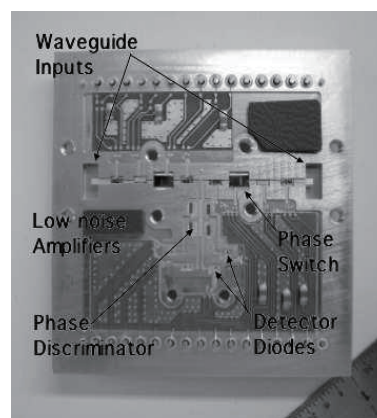


图7 Q波段高集成化5.1 cm×5.1 cm模块<sup>[57]</sup>  
Figure 7 Q-band polarimeter 5.1 cm×5.1 cm module [57].

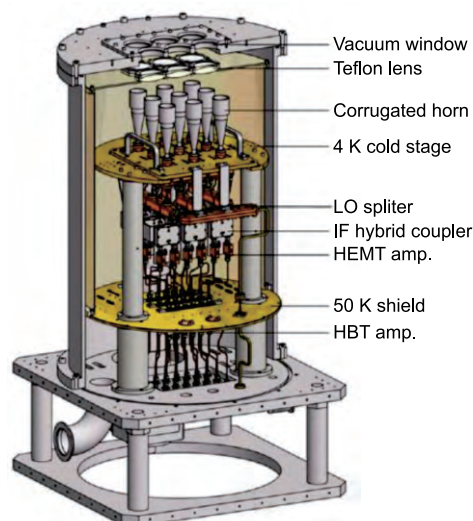


图8 (网络版彩图)接收机系统结构<sup>[63]</sup>  
Figure 8 (Color online) Mechanical structure of receiver system [63].



与传统的阵列馈源相比, 相控阵接收机PAFs (Phased Array Feeds) 有很多小单元组成, 每个单元增加了数字输出, 采样效率高于焦平面区域. 相控阵技术涉及相位、波束合成、区别于传统单一像素馈源喇叭阵列的阵列模块, 而传统的器件采样不到可获得的深空区域视野的1/16.

射电天文领域, 荷兰、澳大利亚、加拿大、美国NRAO均在研究PAFs接收机技术<sup>[65]</sup>. 2007–2008年NRAO和杨百翰大学联合研制的19波束单极化PAFs安装于Green Bank 20 m射电望远镜进行测试<sup>[65,66]</sup>, 如图9所示. 该接收机由19个偶极子天线阵列组成, 系统温度65 K. 2010年第2代制冷PAFs研制完成, 由38个SiGe低噪声放大器和19个双极化天线组成. 并在户外环境及安装于Green Bank 20 m射电望远镜进行测试, 系统温度20–28 K, 其中接收机噪声温度8–13 K, 天线损失1–4 K, 相互耦合2 K<sup>[67]</sup>.

2015年, 第3代L波段19波束双极化制冷PAFs接收机在Green Bank研制完成, 并安装于GBT主焦. 技术人员进一步对偶极子天线阵列进行优化, 采用双极化交叉振子天线, 如图10所示, 这种天线容易制作, 且可自



图9 (网络版彩图)PAFs测试<sup>[65]</sup>  
Figure 9 (Color online) Measured for PAFs [65].



图10 (网络版彩图)19波束交叉极化偶极子天线阵列<sup>[68]</sup>  
Figure 10 (Color online) 19 element dual-polarization array [68].

由调节阻抗, 能够更好地与低噪声放大器匹配, 减小天线阵列的耦合效应. 工作带宽内Median噪声温度小于45 K<sup>[68]</sup>.

目前, PAFs波束合成信号处理的领跑者为CASPER (Collaboration for Astronomy Signal Processing and Electronics Research), FPGA (Field-programmable Gate Array)开发系统, 此系统具有创新固件模块设计、独特的波束合成功能, 相关开发工作需付出大量的努力. 目前CASPER已成功开发大量的固件模块, 可直接应用于PAFs. PAFs未来几年可以达到的频率范围为0.5–15 GHz; 在0.5 GHz以下, 由于阵列尺寸庞大, 不适合大多数射电望远镜, 此频段更适合传统馈源阵列; 而高于15 GHz在焦平面区域传统喇叭阵列波束效率更高.

### 3.2 多波束接收机关键技术与挑战

为满足科学目标, 多波束接收机需要满足: 低噪声、双极化、超宽瞬时带宽(10–20 GHz或更宽)、紧凑的馈源阵列(波束之间 $\leq 2.5$ 个波束宽度)、在uJy量级具有稳定的基线及高的谱线分辨率. 满足相关要求将面临一系列的技术挑战.

#### (1) 馈源阵列电性能优化设计

外差式接收机最大的挑战是大范围焦平面馈源阵列应用, 此区域将接收天线单元集中在一起, 并满足尺寸要求及电磁性能. 馈源阵列器件之间存在较强的耦合, 阵列尺寸及电性能的优化非常关键, 对于基本的天线单元模型, 设计人员需进行结构优化, 建立基于拓扑关系的参数集合.

馈源阵设计基于射电望远镜的几何光学及物理结构, 其结构的选择原则上保证低溢出和较好的交叉极化性能; 馈源喇叭直径选择、喇叭间距的设计需要保证射电望远镜的照明效率. 其次, 通过电磁仿真软件, 仿真分析喇叭之间相互耦合的影响, 优化馈源阵列尺寸, 提高孔径效率, 减小交叉极化的影响, 改善馈源阵列的电性能. 另外, 电磁仿真软件需与反射面分析软件相结合, 对总的天线辐射模型仿真及分析, 优化其电性能及波束效率.

喇叭阵列的相关测试技术及方法需要在未来工作中研究, 在实践中发展和积累经验, 如测试喇叭阵列工作带宽的反射系数、插入损耗、交叉极化照明等性能指标测量.

#### (2) 低噪声、宽带MMIC技术

射电天文接收机为获得极低噪声温度, 将低噪声放大器等器件制冷到物理温度15 K. 而MMIC代工厂提供的器件模型一般只适用于 $-50\sim 85^{\circ}\text{C}$ 之间, 在15 K极低温度下的MMIC器件, 特别是核心组件HEMT的模型参数变化非常大. 如何准确建立晶体管和被动器件的低温模型, 是MMIC设计和优化的关键问题.

MMIC需组装成模组, 并装配合适的输入输出接口, 以满足接收机中连接和装配. 对于毫米波模组, 信号波长已经与电路尺寸相当, 需评估引线、接地孔、片内反馈、电磁干扰等因素对电路性能的影响. 而对于性能要求极高的低温低噪声放大器更是如此. MMIC放大器整体设计要充分考虑MMIC外围元器件的影响、输入输出匹配结构, 并结合接收机设计选择合适的输入输出接口形式, 甚至还要为便于低温制冷设计特定的结构和外形. MMIC LNA低温测试技术极为重要, 为MMIC建模和设计提供实测数据, 并为进一步改进和优化设计提供依据. 低温测试中, MMIC本身噪声极低, 测试系统将引入系统误差, 增加测量的不确定度.

### (3) 接收机系统的集成和组装

馈源喇叭阵列的有效集成和组装是一个技术难题. 而任何大规模焦平面阵系统都需要克服这个问题, 且这个问题被习惯性的低估. 焦平面阵列数据采集由单像素接收机演化而来, 而阵列中高达数十个的器件, 很难自然地组装为一个独立的接收机; 而有效地集成在一起是一个技术挑战. 另外, 其研制价格昂贵、耗时, 对于数十波束的阵列, 从一个量级到另一个量级升级非常困难, 所以传统的方法需要打破, 高集成、多功能微波模块的应用必不可少. 例如美国马萨诸塞州大学为五大学射电天文台研制的SEQUOIA (Second Quabbin Optical Imaging Array)接收机, 为16像素的85–115 GHz接收机阵列, 微波器件的密度相当巨大, 尽管零部件已经很紧凑地排布在馈源投影区域之内, 但是还有大多数其他器件远离馈源或焦点. 模拟信号器件增益和相位波动受温度的影响非常显著, 系统的稳定度和精确校准是实现高灵敏度观测的关键因素. 焦平面阵列集成与组装问题并不是指馈源后面的所有器件越小越好, 更重要是必须要考虑热传输、热膨胀、重量限制、真空度、功耗、信号路径分布及制冷负载等. 此外, 所有组装的器件需要进行测试, 且方便后期的维护及更换.

### (4) 大规模制冷技术及热设计

制冷技术可以使大范围阵列单元的关键部件冷却, 提供系统噪声温度, 相关技术的研究非常重要. 需要为接收机杜瓦设计更大的微波窗口, 以满足馈源喇叭阵列制冷. 而制冷在真空状态下完成, 微波窗口需具有足够的强度, 以承受真空压力; 另外, 要求微波窗口的透波性能极好, 且插损极小, 以减小其对系统噪声温度的贡献, 而相关材料科学及测试技术需要研究.

任何大范围多馈源阵列系统有很多区域需要进行散热设计, 包括微波窗口热负载、低噪声放大器输出的热传输及机械热膨胀等各种因素. 各个区域散热管理的方案需要研究和优化, 以达到系统整体的最佳性能指标.

### (5) 数据传输与存储技术

大规模焦平面阵列接收机要求数据从接收机传输到信号处理系统, 需要更大的数据传输速率和信号处理带宽. 与现存的接收设备相比, 下一代接收机的数据输出量更大. 如GBT K波段7波束接收机系统, 数据量约10 MB/s, 0.8 TB/d; 而对于100波束的焦平面阵列, 其数据量约1 GB/s, 80 TB/d. 很多情况下, 焦平面阵列远离终端数据处理设备, 实际情况下需要减小数据传输过程中产生的电磁干扰. 传统的模拟传输并不稳定, 导致观测中稳定性大大降低. 所以, 数字传输系统具有很好的前景, 但是也面临一系列的问题. 当前的多波束接收机很庞大、很重、功耗大, 且大的焦平面阵列非常昂贵, 替代技术如模拟数字转换器很有帮助, 但是在开发之前也需要进行大量的研究, 同时还需要对集成电路或其他技术进行研究, 以减小系统尺寸、重量、功耗, 减少其他系统产生的无线电干扰.

综上所述, 多波束接收机研制在保证多波束接收机灵敏度度和效率的同时, 研发造价更低、更稳定、更紧凑、更可靠、可灵活配置、重量轻并具备宽带数据传输的高性能接收机系统将是射电天文技术的重大挑战.

## 4 QTT接收机方案设计

QTT依照其科学研究目标和科学应用目标, 接收频段主要是厘米波段和长毫米波段, 频率覆盖范围从115 MHz–115 GHz. 依据科学目标及接收机技术现状, 初步的接收机系统配置方案见表3.

QTT馈电形式: 100, 30 cm低频段单波束接收机馈



表3 接收机系统初步方案  
Table 3 The preliminary scheme for receiver system

接收机波段	频率范围 (GHz)	焦点位置	馈源形式	极化方式	科学目标
100 cm	0.15–0.6	Prime	Kildal	双线	脉冲星、暂现源
20 cm	0.6–4	Prime	Horn	双线	脉冲星、暂现源、HI、OH、河外星系
6 cm	4–8	Greg.	Horn	双线	脉冲星、分子谱线、河外星系; VLBI
1.3 cm	12–30	Greg.	Horn	双线	脉冲星、H <sub>2</sub> O、NH <sub>3</sub> ; VLBI
13/3.6 cm	2.2–2.5 8–9	Greg.	Horn	双圆	VLBI、深空探测、分子谱线、河外星系
15 cm-PAF	1–2	Prime	PAF	双线	脉冲星、暂现源、HI、OH、河外星系
7mm-MB	30–50	Greg.	19-Beam	双线	分子谱线巡天、高红移CO谱线
3mm-MB	70–117	Greg.	19-Beam	双线	分子谱线巡天

电方式采用前馈; 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, 采用线极化方式. 现阶段考虑在15 cm波段采用相控阵接收机, 7和3 mm波段采用传统多波束接收机, 以实现高效率巡天观测. 除了VLBI接收机, 其他波段均为线极化. QTT各接收机的带宽比均高于一个倍频程, 对微波元器件工作带宽的要求非常高. 微波固态器件发展非常快, 大多数固态器件的频带都能达到一个甚至几个倍频程, 而限制接收机带宽的关键器件是馈源/极化器、低噪声放大器等, 相关器件选型考虑如下.

(1) 100 cm波段接收机由于工作频率较低, 要获得良好的电气性能则馈源的物理尺寸很大, 规划采用前馈方式居于主焦点. 馈源形式考虑采用Eleven馈源, 以实现需求的频率覆盖, 且兼具较好的电气性能.

(2) 20 cm波段馈源考虑采用超宽带介质加载四脊喇叭馈源. 目前对介质加载四脊喇叭馈源进行了设计、加工和测试, 如图11所示. 四脊喇叭两个极化端口的电压驻波比小于2, 隔离大于20 dB. 此馈源与澳大利亚CSIRO设计的超宽带馈源相比, 具有工作带宽更大、照射角度更宽、选材简单、加工方便等优点; 但是馈源的驻波、隔离等性能仍有改进空间. 极化器拟采用 OMT+90°混合器的方式实现, 制冷接收机中 OMT及混合器需制冷至20 K, 以获得尽可能低的噪声温度, 而低温环境下极化器参数指标的准确测量非常困难, 相关技术需要研究. 另外, 短厘米波段和毫米波段的微波波导器件物理尺寸较小, 机械加工的精度对其性能影响很大, 设计仿真与实测结果往往出入比较

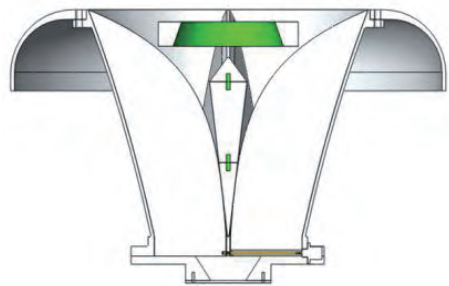


图11 (网络版彩图)四脊喇叭馈源模型  
Figure 11 (Color online) Quad-Ridge feed model.

大. 尽管目前数控加工中心能实现高精度复杂曲面加工, 但是各种型式的OMT需分解成多个模块分别加工再进行装配, 装配误差远远大于加工误差. 所以, 如何设计分解, 尽可能减小装配误差, 同时又具备良好的可加工性, 也是OMT设计要解决的关键问题.

(3) 20 cm及更短波频段的接收机采用后馈方式, 位于格里高利焦点. 这些波段的馈源拟采用高性能的波纹喇叭馈源, 波纹喇叭具有很宽的工作带宽, 而整个系统的带宽取决于极化器. 对于VLBI观测, 为避免复杂的极化偏振计算, 采用圆极化接收方式. 传统的圆极化器, 如隔板(Septum)极化器等, 具有结构简单紧凑、插入损耗小、易于设计和加工等优势, 被广泛应用于射电天文接收机; 但是其带宽一般都比较窄, 相对带宽10%左右, 带宽更宽时则性能急剧下降. 对于带宽比更高的波段, 如QTT规划的6 cm波段(2–12 GHz), 模拟器件自身的带宽限制已经很难实现高性能的圆极化转换, 数字信号算法和处理在理论上能完全替代模拟器件的功能; 考虑采用数字极化器DOMT (Digital

Ortho-Mode Transducer), 大大减小器件尺寸, 经精确校准后极化隔离度可以达到40 dB以上, 而模拟极化器一般只能达到20–25 dB, 但是相关技术需要研究.

(4) 7 mm波段接收机的核心器件为低温低噪声放大器. 国外天文台和其他相关研究机构针对低噪声放大器开展了深入的研究, 且相关成果应用于射电天文接收机, 大大提高了射电望远镜灵敏度. 国外很早就放弃了分立元件低温LNA方案, 着手研究基于MMIC的低温LNA技术, 研究领域涉及GaAs, InP, SiGe等半导体材料和加工工艺、各类器件的低温模型、MMIC LNA设计和测试等. 对于7 mm波段, 基于InP HEMT的MMIC LNA技术已经比较成熟, 而国内受限于半导体工艺水平, 相关技术相对落后.

近几年, 新疆天文台与中国科学院微电子所合作针对InP HEMT MMIC低噪声放大器技术进行研究. 新疆天文台微波技术实验室拥有矢量和标量微波网络分析仪、频谱分析仪、噪声系数测量仪、微波信号

源、微波功率计微波测量仪器, 能够开展7 mm MMIC低温测试技术研究. 中国科学院微电子研究所从事MMIC设计及其模块开发, 拥有20多年研发经验, 具有0.18–65 nm CMOS射频集成电路、0.35–0.13  $\mu\text{m}$  SiGe BiCMOS和GaAs HBT/pHEMT 微波单片集成电路开发平台. 目前, 已初步研制出12–36和30–50 GHz低温MMIC LNA, 性能指标有待进一步改善, 且相关技术的研究需要更加深入.

## 5 结论

超宽带和多波束接收是大口径射电望远镜的重要发展方向, 也是QTT接收机系统的难点和挑战. 在保障接收机系统关键器件性能指标的同时, 解决超宽带的馈源/极化器、低温低噪声放大器、多波束接收机集成和组装等技术难题是实现QTT科学目标的技术保障.

## 参考文献

- 1 Coutts G M. Octave bandwidth orthomode transducers for the expanded very large array. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2011, 59: 1910–1917
- 2 Ott J, Briske W, Carilli C, et al. Pushing the Limits of the EVLA: An Enhancement Program for the Next Decade. Technical Report, Electronics and Computer Science, National Radio Astronomy Observatory. 2010
- 3 Chung M H, Khaikin V B, Kim H R, et al. A next generation multi-beam focal plane array receiver of traos for 86–115 GHz band. *J Astron Space Sci*, 2006, 23: 19–28
- 4 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 [吴盛股, 南仁东. 射电天文中焦面阵或多波束馈源的应用. *天文学进展*, 2001, 19: 421–435]
- 5 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]
- 6 Thomas B M, James G L, Greene K J. Design of wide-band corrugated conical horns for Cassegrain antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1986, 34: 750–757
- 7 Thomas B M, Greene K J, James G L. A wide-band prime-focus horn for low-noise receiver applications. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1990, 38: 1898–1900
- 8 Olsson R, Kildal P S, Weinreb S. The eleven antenna: A compact low-profile decade bandwidth dual polarized feed for reflector antennas. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2006, 54: 368–375
- 9 Karandikar Y B, Kildal P S. Optimization of 200–800 MHz Eleven feed for GMRT. In: *Proceedings of Antennas and Propagation*. ITE, 2007
- 10 Beaudoin C, Kildal P S, Yang J, et al. Development of a compact eleven feed cryostat for the patriot 12-m antenna system. In: *Proceedings of the Sixth General Meeting of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*. National Aeronautics and Space Administration, 2010. 420–424
- 11 Yang J. Preliminary design of eleven feed for SKA band 1. In: *Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 2014 XXXIth URSI. IEEE, 2014
- 12 Ivashina M, Bencivenni C. Optimization of the 0.35–1.05 GHz quad-ridged flared horn and eleven feeds for the square kilometer array baseline design. In: *Proceedings of Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*. IEEE, 2014. 513–516
- 13 Dunning A, Bowen M, Bourne M, et al. An ultra-wideband dielectrically loaded quad-ridged feed horn for radio astronomy. In: *Proceedings of Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*. IEEE, 2015

- 14 Dybdal R B. Defocusing loss for a log periodic-fed reflector. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1985, 33: 809–812
- 15 Engargiola G. Tapered Microstrip Balun for ATA Feed Development. Technical Report, Electronics and Computer Science, Hat Creek Radio Observatory. 2001
- 16 Uher J, Bornemann J, Rosenberg U, et al. Waveguide Components for Antenna Feed Systems: Theory and CAD. Norwood: Artech House Publishers, 1993
- 17 Aramaki Y, Yoneda N, Miyazaki M, et al. Ultra-thin broadband OMT with turnstile junction. In: *Proceedings of 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. IEEE, 1993. 47–50
- 18 Groppi C E, Drouet D, Aubigny C Y, Lichtenberger A W, et al. Broadband finline ortho-mode transducer for the 750–1150 GHz band. In: *Proceedings of the 16th International Symposium on Space Terahertz Technology*. Göteborg, 2005. 513–518
- 19 Srikanth S, Solatka M. A compact full waveguide band turnstile junction orthomode transducer. In: *Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium*, 2011 XXXth URSI. IEEE, 2011
- 20 Bøifot A M, Lier E, Schaug-Pettersen T, et al. Simple and broadband orthomode transducer. *Proc Inst Elect Eng*, 1990, 137: 396–400
- 21 Navarrini A, Plambeck R L. A turnstile junction waveguide orthomode transducer. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2006, 54: 272–277
- 22 Aramaki Y, Yoneda N, Miyazaki M, et al. Ultra-thin broadband OMT with Turnstile junction. In: *Proceedings of 2003 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. IEEE, 2003
- 23 de Villiers D I L, P Meyer, Palmer K D. Design of a wideband orthomode transducer. In: *Proceedings of AFRICON 2009*. IEEE, 2009
- 24 Coutts G M, Dinwiddie H, Lilie P. S-band octave-bandwidth orthomode transducer for the expanded very large array. In: *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Charleston, 2009
- 25 Lilie P. Octave Bandwidth OMT Development in the 1–8 GHz Range. Technical Report, Electronics and Computer Science, EVLA Front-End CDR-OMT Development. 2006
- 26 Robertson S D. Recent advances in finline circuits. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1956, 4: 263–267
- 27 Chattopadhyay G, Carlstrom J E. Finline ortho-mode transducer for millimeter waves. *IEEE Microw Guid Wave Lett*, 1999, 9: 339–341
- 28 Skinner S J, James G L. Wideband ortho-mode transducers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1991, 39: 294–300
- 29 Chiong C C, Huang D J, Chuang C C, et al. Cryogenic 8–18 GHz MMIC LNA using GaAs PHEMT. In: *Proceedings of 2013 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. IEEE, 2013
- 30 Lloriu B, Bellec M, LeRouezic M. Performances a basse temperature d'un transistor hyperfréquences faible bruit a effet de champ. *Electron Lett*, 1970, 6: 819–820
- 31 Jimnez J, Oliva J, Septier A. et al. Very low noise cryogenic MESFET amplifier. In: *Proceedings of 1973 3rd European Microwave Conference*. IEEE, 1973. 1: 1–4
- 32 Liechti C A, Larrick R B. Perform of GaAs MESFET's at low temperatures. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1976, 24: 376–381
- 33 Weinreb S. Low-noise cooled GASFET amplifiers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1980, 28: 1041–1054
- 34 Weinreb S, Harris R W, Fenstermacher D L. Ultra-low-noise 1.2- to 1.7-GHz cooled GaAsFET amplifiers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1982, 30: 849–853
- 35 Pospieszalski M W. Extremely Low-Noise Amplification with Cryogenic FET's and HFET's: 1970–2004. Technical Report, Electronics and Computer Science, Electronics Division Internal Report No. 314, National Radio Astronomy Observatory Charlottesville. 2005
- 36 Pospieszalski M W. Low-Noise, 8.0–8.8 GHz, Cooled, GASFET Amplifier. Electronics Division Internal Report, National Radio Astronomy Observatory, 1984. No. 254
- 37 Nguyen L D, Larson L E, Mishra U K. Ultra-high speed modulation-doped field-effect transistors: A tutorial review. *Proc IEEE*, 1992, 80: 494–518
- 38 Pospieszalski M W, Weinreb S, Chao P C, et al. Noise parameters and light sensitivity of low-noise high-electron-mobility transistors at 300 K and 12.5 K. *IEEE Trans Electron Devices*, 1986, 33: 218–223
- 39 Pospieszalski M W, Weinreb S, Chao P C, et al. Noise parameters and light sensitivity of low-noise high-electron-mobility transistors at 300 and 12.5 K. *IEEE Trans Electron Devices*, 1986, 33: 218–223
- 40 Pospieszalski M W, Weinreb S, Norrod R D, et al. FETs and HEMTs at cryogenic temperatures-their properties and use in low-noise amplifiers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 1988, 36: 552–560
- 41 Duh K H G, Pospieszalski M W, Kopp W F, et al. Ultra-low-noise cryogenic high-electron-mobility transistors. *IEEE Trans Electron Devices*, 1988, 35: 249–256
- 42 Pospieszalski M W. Ultra-low-noise receivers for the 1 to 120 GHz frequency range. In: *Proceedings of 23rd European Microwave Conference*. Madrid, 1993. 73–79



- 43 Mishra U K, Brown A P, Rosenbaum E, et al. Microwave performance of AlInAs-GaNAs HEMT's with 0.2- and 0.1- $\mu\text{m}$  gate length. *IEEE Electron Device Lett*, 1988, 9: 647–649
- 44 Randa J, Gerecht E, Dazhen Gu E, et al. Precision measurement method for cryogenic amplifier noise temperatures below 5 K. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2006, 54: 1180–1189
- 45 Pandian J D, Baker L, Cortes G, et al. Low-noise 6–8 GHz receiver. *IEEE Microwave*, 2006, 7: 74–84
- 46 Schlee J, Wadefalk N, Nilsson P A, et al. Cryogenic 0.5–13 GHz low noise amplifier with 3 K midband noise temperature. In: *Proceedings of 2012 IEEE International Microwave Symposium Digest (MTT)*. IEEE, 2012
- 47 Tang Y L, Wadefalk N, Morgan M A, et al. Full-band high performance InP MMIC LNA module. In: *Proceedings of 2006 IEEE International Microwave Symposium Digest*. IEEE, 2006. 81–84
- 48 Kettle D, Roddis N, Sloan R. A lattice matched InP chip set for a band radiometer. In: *Proceedings of 2005 IEEE International Microwave Symposium Digest*. IEEE, 2005. 1033–1036
- 49 Aja Abelan B, Seelmann-Eggebert M, Bruch D, et al. 4–12- and 25–34-GHz cryogenic mHEMT MMIC low-noise amplifiers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2012, 60: 4080–4088
- 50 Bryerton E W, Mei X B, Kim Y M, et al. A W-band lownoise amplifier with 22 K noise temperature. In: *Proceedings of 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*. IEEE, 2009. 681–684
- 51 Varonen M, Reeves R, Kangaslahti P, et al. An MMIC low-noise amplifier design technique. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2016, 30: 826–835
- 52 Weinreb S, Bardin J C, Mani H. Design of cryogenic sige low-noise amplifiers. *IEEE Trans Microwave Theor Tech*, 2007, 55: 2306–2312
- 53 Bird T S. Coaxial feed array for a short foca+length reflector. *IEEE Antennas Propag Soc Symp*, 1997, 3: 1618–1621
- 54 Staveley-Smith L, Wilson W E, Bird T S, et al. The parkes 21 cm multibeam receiver. *Publ Astron Soc Aust*, 1996, 13: 243–248
- 55 Bird T S. A multi beam feed for the parkes radio-telescope. *IEEE Antennas Propag Soc Symp*, 1994, 2: 19–24
- 56 Keller R, Nalbach M, Müller K, et al. Multi-Beam Receiver for Beam-Park Experiments and Data Collection Unit for Beam Park Experiments with Multi-Beam Receivers. Technical Report, Electronics and Computer Science, Max-Planck-Institut für Radioastronomie. 2006
- 57 Chinone Y. Measurement of Cosmic Microwave Background Polarization Power Spectra at 43 GHz with Q/U Imaging Experiment. Ddissertation for Doctoral Degree. Sendai-shi: Tohoku University, 2010
- 58 Buder I. Q/U imaging experiment (QUIET): A ground-based probe of cosmic microwave background polarization. In: *Proceedings of Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy*. SPIE, 2010
- 59 Dumoulin R N. Responsivity calibration of the QUIET Q-band array. In: *Proceedings of Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy*. SPIE, 2010
- 60 Monsalve R A. Beam characterization for the QUIET Q-Band instrument using polarized and unpolarized astronomical sources. In: *Proceedings of Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V*. SPIE, 2010
- 61 Gom B, Naylor D, Leclerc M. Optical design of the SCUBA-2 FTS. In: *Proceedings of 15th International Conference on Infrared and Millimeter Waves*. IEEE, 2007. 458–459
- 62 Bintley D, Per Friberg P, Macintosh M J, et al. Characterising and calibrating the SCUBA-2 superconducting bolometer arrays for science observing. In: *Proceedings of 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*. IEEE, 2010
- 63 Shan W, Yang J, Shi S, et al. Development of superconducting spectroscopic array receiver: A multibeam 2SB SIS receiver for millimeter-wave radio astronomy. *IEEE Trans THz Sci Technol*, 2012, 2: 593–604
- 64 Yang J, Shan W L, Shi S C, et al. The superconducting spectroscopic array receiver (SSAR) for millimeter-wave radio astronomy. In: *Proceedings of Global Symposium on Millimeter Waves*. IEEE, 2008. 177–179
- 65 Warnick K F, Jeffs B D, Landon J, et al. BYU/NRAO 19-element phased array feed modeling and experimental results. In: *Proceedings of URSI General Assembly*. Chicago, 2008
- 66 Norrod R D, Fisher J R, Jeffs B D, et al. Development of cryogenic phased array feeds for radio astronomy antennas. In: *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium Phased Array Systems and Technology (ARRAY)*. IEEE, 2010. 629–631
- 67 Norrod R D, Fisher J R, Jeffs B D, et al. Cryogenic phased array feed development. In: *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (ARRAY)*. IEEE, 2010
- 68 Roshi D A, Shillue W, Fisher J R, et al. Summary of January 2015 paf Observations with the gbt, Results and Comparison with paf Model. Technical Report, Electronics and Computer Science NRAO Electronic Division Internal Report 326, National Radio Astronomy Observatory, 2015

# Ultra-wideband receiver technology development for radio astronomical large aperture telescope

CHEN MaoZheng<sup>1,2</sup>, LIU Qi<sup>1,2\*</sup>, MA Jun<sup>1,2</sup> & WANG Na<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

<sup>2</sup> *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*

Xinjiang 110 m radio telescope (QiTai 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. However, many ultra-wideband, multi-beam receivers will be applied for various science goals of QTT, and we will be faced with numerous significant challenges. In this paper, we have presented the technical progress of ultra-wideband receiver for large aperture telescope, including the ultra-wideband feeds/Ortho-Mode Transducer (OMT), Low Noise Amplifier (LNA) and multi-beam receiver. Meanwhile, key techniques and challenges were analyzed for receiver research and fabrication. Based on the science requirements and the technique development, we have proposed the preliminary scheme for QTT receiver system, and discussed about the feed forms, primary devices research and key coming difficulties and challenges.

**radio astronomy, ultra-wideband, receiver technology, large aperture telescope**

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

**doi:** 10.1360/SSPMA2016-00505