

# 超导成像频谱仪

杨 戟

曹 凝\*

(中国科学院紫金山天文台 南京 210008) (中国科学院计划财务局 北京 100864)

关键词 科研装备, 超导成像频谱仪

## 1 科学背景

毫米波射电是观测研究宇宙各层次结构和演化的一个重要波段, 上世纪 70 年代逐渐发展起来。我国在国际上起步较早, 上世纪 80 年代初就部署研制了国内唯一的大中型设备 13.7 米毫米波望远镜, 也是迄今为止国际上为数不多的中型亚毫米波天文观测设备。13.7 米毫米波望远镜是我国毫米波段重要的开放设备, 自 1996 年该望远镜 3 毫米波段接收机建成使用以来, 已在国内外开放观测中完成了上百个天文研究课题, 取得了一系列重要的天文发现。

随着天文观测研究的发展, 现有的毫米波接收机性能越来越难以满足要求。如星系中的恒星形成和演化、银河系结构、太阳系天体物理研究等各层次天文研究的发展, 一台天线配备一个接收单元的单元铅笔束扫描方式限制了在空间上实现大范围的观测覆盖, 需要能够在空间上同时进行多点接收的“成像”探测器(或焦面阵列接收机)以提高空间覆盖的能力。其次, 原有的 SIS 接收机混频器以双边带方式工作, 上、下边带的毫米波信号在混频后同时进入一个中频信号。随着研究工作的深入对整个望远镜系统

探测灵敏度要求越来越高, 需要探测的谱线信号都是更为微弱的信号, 因此, 上下边带谱线在同一路中频内的混淆问题逐渐显现出来。在河外星系的观测中, 由于星系整体速度场常常达到几百千米/秒, 相应的频率展宽 >400 MHz。在这种情况下, 目前的双边带工作模式在观测河外  $^{12}\text{CO}$  和  $^{13}\text{CO}$  ( $J=1-0$ ) 谱线的时候, 在中频空间将出现严重的谱线混淆(重叠)现象。再者, 由于 118 GHz 附近大气中  $\text{O}_2$  分子和大气水汽的影响, 工作在 110 GHz 附近的毫米波接收机上、下边带大气的不透明度差异大并且变化剧烈, 给观测数据的校准精度带来了严重的限制。

针对上述问题, 在国家重大科研装备研制专项支持下, 紫金山天文台利用最新开发成功的毫米波边带分离混频技术, 开展我国第一台超导 SIS 混频器的多像元成像频谱仪的研制工作。该设备研制成功后, 将使我国在毫米波探测技术上实现从单像元向空间成像的突破, 将目前毫米波望远镜的观测能力提升 9 倍, 达到国际同类设备的领先水平, 为河外星系中的毫米波谱线观测研究、分子云与恒星形成研究、大气科学研究等提供最强有力的观测支持, 使我国在毫米波段

\* 中国科学院计划财务局副局长。E-mail: zbc@cashq.ac.cn  
收稿日期: 2011 年 6 月 20 日

的空间探测技术进入国际前沿。

## 2 装置综述

超导成像频谱仪是基于超导隧道结混频技术和边带分离技术的焦平面阵列接收机,是为我国大型毫米波望远镜自主研制的新一代接收系统。该设备在研制过程中发展了边带分离无调谐超导 SIS 混频技术、高性能低温中频技术、毫米波数字合成本振及功率分配技术,成功实现了大规模毫米波系统集成。该设备是国际上毫米波段的第一例基于边带分离技术原理的多波束接收机,也是我国射电天文领域研制的第一台多波束接收机。

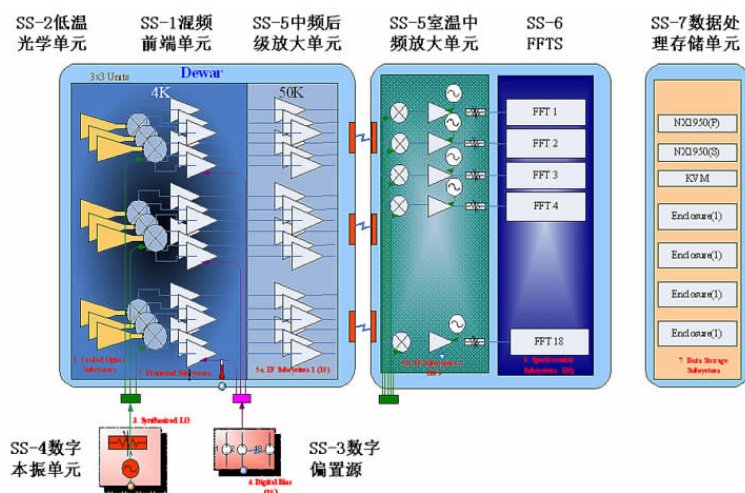
超导成像频谱仪主要包括:边带分离 SIS 混频器、无调谐本振源、数字偏置源、独立 IF(Intermediate Frequency)以及数字频谱仪等主要部分,具体由  $3 \times 3$  个接收馈源,18 套由超导 SIS 混频器、低噪声 HEMT(High Electron Mobility Transistor)放大器、低温 SiGe HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) 放大器、数字 SIS 偏置电源和 HEMT 偏置电源、1 GHz 带宽 16 384 通道数字频谱仪组成的接收机,1 套数字本振、4-K 致冷杜瓦、前端控制台及后端控制台计算机等组成。

在每一个边带分离 SIS 混频器单元中,毫米波信号从馈源被均分成两路,输入到两个等等的(集成的)混频器中,本振信号也同时被分配到两个混频器上,其中一路的相位被延迟  $90^\circ$ 。从两个混频器中输出的中频信号 IF 连接到一

个中频耦合器上并移相  $90^\circ$ , 在这里上、下边带的 IF 信号被分离出来,分别从耦合器的两个输出端导出,信号的边带分离度在 10 dB 以上。输出的 18 路上、下边带 IF 信号经过独立的放大,输入到数字频谱仪进行频谱分析。经过分离的上下边带的 IF 信号经过独立放大,用 FFT (Fast Fourier Transformation) 数字频谱仪进行频谱分析,最终获得毫米波天体谱线信息。

在该设备中,紫金山天文台首次应用数字合成本振源 LO(Local Oscillator)。LO 信号来自数字合成的微波信号发生器(12.5—20 GHz),经过倍频器( $\times 2 \times 3$ ),提供 75—120 GHz 的本振信号,使混频器工作在标准的 75—116 GHz 频段内。使用这种数字合成本振源相比毫米波接收机普遍采用的耿氏振荡器本振信号解决方案而言具有显著的技术优点,最主要的体现是接收机工作频率的切换可以在瞬间完成,使系统进行频率切换和大范围频谱巡查能力有新的提高。

在多像元接收前端中,9 个像素的本振信号 LO 用一个微波数字合成信号发生器(40 GHz)来提供。该信号发生器提供一致的频率跟踪,精度为 0.01 Hz。微波信号经过 3



超导成像频谱仪系统框图

倍频放大器,在 80—120 GHz 频段内提供 >8 mW 的功率输出。这些 LO 功率经过均分和耦合电桥被耦合到每一个混频器单元中。

在该设备中,紫金山天文台自行设计和研制了超导 SIS 混频器数字偏置电源。该数字偏置源能提供偏置扫描、恒流、恒压等输出模式,并具备全部的远程计算机操作功能,可满足多像元成像系统中 9 个 SIS 混频器的实用需求。

另外,在该设备中,紫金山天文台首次应用了基于 FPGA(Field Programmable Gate Array)的宽带、高分辨数字 FFT 频谱仪。频谱仪共计接受 18 路独立的 IF 输入。每路独立进行 8-bit、1Gs/s 采样或单独一路进行 2Gs/s 采样,瞬时带宽为 1 GHz。采样后的数据流用 FPGA 进行实时 FFT 频谱运算。基于 FPGA 芯片,实时处理 1GHz 信号带宽、频点数为 16 384 的知识产权内核也由项目组研发,具有自主的知识产权。

除以上创新点以外,超导成像频谱仪在研制过程中采用的其他关键技术主要还有:

采用商用室温微波器件,研制了 4K 温度工作的高性能 IF Hybrid 和 50K 温度工作的高性能 SiGe MMIC (Monolithic Micro-

wave Integrated Circuit) LNA (Low Noise Amplifier),实现了低温环境下后级中放集成,提高了中频系统稳定性、集成度及噪声性能;

SIS 混频器实现了全频段内动态阻抗接近 50W,展宽了可稳定工作偏置电压范围,结合低温 MMIC LNA 实现了无隔离器混频前端;

采用了简单的透射型准光学系统,并引入低温透镜降低信号传输损耗对系统噪声的贡献。

### 3 组织与管理

在组织管理方式方面,超导成像频谱仪研制项目实行主管部门领导下的单位法定代表人负责制,成立了项目管理工作组和研制项目组,聘请项目专家组成咨询组。项目管理工作组主要负责项目的全过程管理,组长由紫金山天文台台长担任,成员由单位主要领导、项目专家委员会、主要职能部门以及项目负责人和相关专家组成。研制项目组主要承担项目整体设计、分系统研制任务。专家咨询组对项目的技术方案和科学应用目标进行审核,对项目设计方案中的重大问题提出咨询意见,对研制过程中的重大调整和纠错提出咨询意见。

### 4 应用

超导成像频谱仪于 2010 年底研制完成,其噪声温度和边带分离度两个关键指标均超过设计要求。该设备于 2010 年 11 月成功安装到青海德令哈 13.7 米望远镜,立即投入了超新星遗迹、星际分子云、恒星形成区等若干课题观测。以对超新星遗迹 IC443 B 点附件受到激波扰动气体的分布成图观测为例,使用



超导频谱仪系统

“超导成像频谱仪”结合 OTF(on-the-fly)观测方式,仅用时 40 分钟即得到了高信噪比图像。而采用原有单像元系统,覆盖相同的区域,使用逐点扫描方式得到质量接近的结果则需要 700 分钟。经过对比观测结果可以清楚地看到,前者有更高的对比度和更小的背景起伏,这是大幅缩短了观测时间后减小了大气变化和望远镜系统慢飘对背景影响的结果。另外,已完成的一系列应用对比显示,与以往的单波束接收机相比,超导成像频谱仪使望远镜的综合观测效能有了大幅的提高。基于该设备按计划、高质量地完成了研制任务,2010 年 12 月 16 日,超导成像频谱仪研制项目顺利通过验收。

## 5 发展展望

新的边带分离超导成像频谱仪在天文观测中的应用将使我国毫米波望远镜的探测能力在现有的水平上提高几十倍,使我国毫米波射电望远镜在国际同类设备的竞争中取得“领先”

地位。该成像谱仪将用来获得星际气体分布的“三维立体”数据,为天体演化和太阳系起源研究提供最详实的资料。它的直接应用还包括空间和地面的大气科学观测、大气臭氧层和微量分子

探测、分子波谱实验研究等领域,在其他科学和工程领域也将有重要的应用意义。最近,科研人员开始组织银河系分子谱线的系统巡天-银河画卷计划。这个计划将在今后 5—10 年的时间里将北天银道面的星际分子云全面覆盖,预计将取得一批系统的科学发现,巡天数据也将提供国内外各个天文研究领域的人员共享使用。

由于其具有高灵敏度的探测能力和多波束、大天区的覆盖能力,使用该设备能够以前所未有的高速度对宇宙毫米波射电源进行频谱成像观测,获取天体的化学成分、温度、分布和运动状态等性质,使人们能够对大量、弥散的星际介质进行系统、完整的毫米波段观测,获得行星、恒星及宇宙演化重要阶段的图像,对探索天体物理重大问题和发 展毫米波射电天文理论和技术具有重要的基础意义。



项目验收会



中国科学院