

德令哈13.7 m望远镜多波束接收机的运行*

李振强^{1,2†} 张旭国^{1,2} 徐 焯^{1,2} 左营喜^{1,2} 李积斌^{1,2}
孙继先^{1,2} 逯登荣^{1,2} 巨秉刚^{1,2} 张海龙^{1,2} 金风娟^{1,2}
罗春盛^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)

摘要 德令哈13.7 m望远镜是中国最重要的射电望远镜之一. 望远镜自安装超导成像频谱仪以及采用飞行观测模式以来, 运行近10 yr. 在此期间, 望远镜开展并完成大量的天文观测, 累积了巨量的天文数据, 取得了一系列重要的科研成果. 介绍了超导成像频谱仪在天文观测中的运行状态, 运行中疑难问题、故障现象及解决方案. 详述了超导成像频谱仪各方面性能测试及多年来的性能分析, 包含接收机噪声温度及望远镜系统噪声温度、镜像抑制比、接收机稳定性、波束性能等方面. 列举了超导成像频谱仪更新发展方面的工作, 包含本振功率自动化调整、边带分离型超导混频器预放大电路的更新、控制程序的优化等. 总结经验 and 规律, 承前启后, 将过去的超导成像频谱仪的维护运行经验应用到之后新一代大规模接收机系统中.

关键词 射电天文, 多波束接收机, 接收机噪声, 边带分离, 超导SIS混频器

中图分类号: P161; 文献标识码: A

1 介绍

(亚)毫米波是观测研究宇宙各层次结构和演化的一个重要波段, 它包含的分子谱线和冷尘埃热辐射的连续谱线有1000多条. 对于高红移星系远处的冷尘埃和分子, 原恒星和原行星的低温氢附近的冷尘埃和分子, 它们的辐射只有在(亚)毫米波段才能探测到^[1]. 在星系的起源和演化、恒星和行星形成的研究中, 该波段同样扮演着关键角色. (亚)毫米波天文研究在上世纪70年代逐渐发展起来, 产生了一系列重要成果. 另一方面, 单天线望远镜采用单个接收机进行观测, 望远镜的覆盖范围受到限制, 观测能力受到了制约. 随着天文观测研究及技术的发展, 单个天线配备多波束接收机得到了极

2020-08-13收到原稿, 2020-10-09收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11773084)资助

†zqli@pmo.ac.cn

大发展和应用,是大型干涉阵的补充,其具有的快速成像能力使其在大天区覆盖和大样本统计的天文学研究中变得非常重要^[2].多波束接收机的应用使原有的单天线望远镜的观测能力提高数十甚至数百倍.微波波段的多波束接收机在上世纪70年代开始出现,在1988年,使用了肖特基混频器的(亚)毫米波段多波束接收机第1次出现.随着超导SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)混频器的使用,超导SIS混频器的多波束接收机逐渐应用到(亚)毫米波天文观测中.

德令哈13.7 m望远镜的接收机—超导成像频谱仪(Superconducting Spectroscopic Array Receiver, SSAR)便是采用超导SIS混频器的多波束接收机.该设备是我国射电天文领域研制的第1台多波束接收机,也是国际上毫米波段的第1例边带分离型多波束接收机^[3].超导成像频谱仪由紫金山天文台独立自主研发完成,其研制工作开始于2007年,于2010年正式完成并通过验收,2010年11月安装到德令哈13.7 m望远镜上开展天文观测.超导成像频谱仪有3×3个波束,单个波束的半功率波束宽度为50" (115.2 GHz),相邻波束的间隔距离是60 mm,相应的间隔角度是175".超导成像频谱仪工作频段为85–115 GHz,以边带分离型(Sideband Separation, 2SB)超导SIS混频器为核心,采用低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)降低接收机后端的噪声影响,采用数字化本振(Local Oscillator, LO)及多路本振分配技术实现了18路本振的快速、同步的自动化切换.单个波束有2路中频(Intermediate Frequency, IF)输出,超导成像频谱仪共有18路中频.接收机后端由18路快速傅里叶变换频谱仪(Fast Fourier Transform Spectrometer, FFTS)进行实时频谱处理.FFTS瞬时带宽为1 GHz,有16384个通道,频率分辨率为61 kHz.超导成像频谱仪具有超导混频和边带分离两个优势,相比上一代接收机,望远镜的系统噪声低、灵敏度大幅提高,望远镜观测能力也有大幅提高.

自从超导成像频谱仪安装到德令哈13.7 m望远镜并开展天文观测以来,天文学家取得了大量的观测数据,完成了众多的研究课题,获得了一系列重大科研成果.德令哈13.7 m望远镜是中国射电天文望远镜中最重要的观测工具之一.图1是德令哈13.7 m望远镜每年的天文谱线产出量,其中4个时期对应的接收机类型及关键技术依次为肖特基接收机、单波束超导SIS接收机、单波束超导SIS接收机和后端的多谱线系统、超导成像频谱仪和飞行(On The Fly, OTF)观测模式.可以看出,接收机及关键技术的每一次革新,均使望远镜的观测数据量有质的提高.经统计,采用超导成像频谱仪和OTF观测方法后,13.7 m望远镜每年约有1220万条天文谱线产出,是之前采用单波束超导SIS接收机和多谱线系统时的60倍左右.

德令哈13.7 m望远镜向全世界天文研究人员开放,开展银河系内分子云与恒星形成、行星状星云、恒星晚期演化、星际介质物理、星际分子谱线巡天等现代天文学和天体物理若干前沿领域的观测研究,为国家基础研究发展纲要项目、科技部重点研发专项、中科院B类先导专项、国家自然科学基金重大重点项目、科学院创新方向性项目等一系列前沿研究项目的实施提供了观测支持.

“银河画卷巡天”(Milky Way Imaging Scroll Painting, MWISP)是德令哈13.7 m望远镜最为宏大的观测项目,基于望远镜的多波束接收机、多谱线观测、高的空间分辨率、完整的空间取样以及大天区覆盖等多方面的优势,对北天银道面 $\pm 5^\circ$ 范围的天区以及近邻恒星形成区、高银纬星际分子云等区域进行CO多谱线巡天.MWISP观测区域范

围达 2700 deg^2 , 用于研究分子云结构及其在银河系的分布、分子云与其他物质的相互作用和关系, 对了解恒星、行星乃至宇宙起源都具有重要意义. MWISP已经取得了一系列重要成果. 在银河系第2象限最遥远的区域发现一段分子气体旋臂, 是探测到的离银河系中心最远的旋臂^[4]. 利用MWISP巡天数据, 完整地揭示了位于银河系第2象限处外旋臂的分子气体结构^[5]. 极端外银河系区域大质量云核及脉泽的发现^[6]、银河系CO分子厚盘的测量^[7]、巨分子云和纤维状分子云的发现^[8]等成果也是基于MWISP数据完成的.

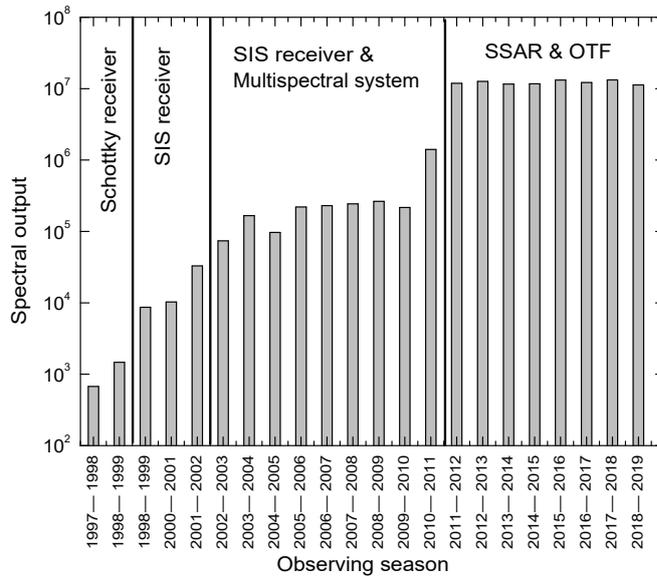


图1 德令哈13.7 m望远镜每年的天文谱线产出量

Fig.1 Annual spectral output of Delingha 13.7 m telescope

除了MWISP, 德令哈13.7 m望远镜的其他课题同样成果斐然. 其中包括Wu等^[9]和Liu等^[10]在国际上首次对普朗克冷尘块CO、HCO+和HCN等分子谱线的成图开展了观测和研究. Yang等人进行了搜寻目标最多、探测到最多I型甲醇脉泽的观测, 并完成了最大的95 GHz I型甲醇脉泽样本^[11]. Liu等人发现一个位于超新星遗迹Kes 73西边延展的伽马射线源, 并为超新星遗迹和分子云之间存在相互作用提供了运动学证据^[12]. Xu等人揭示银河系内部分星际介质是2维片状的, 只是这类片状介质存在一定厚度^[13], 揭示出加利福尼亚(California)巨分子云中第1个深埋星团是被另一个巨分子云撞击后肢解形成, 也揭示出巨分子云中首个星团可能的起源^[14]. Tang等人对金牛座L1495纤维状分子云中的普朗克冷核进行了观测研究, 取得了重要进展^[15].

在超导成像频谱仪近10 yr的天文观测中, 完成如此多重要的天文研究课题, 离不开超导成像频谱仪可靠的运行. 对其设备及器件的维护和更新升级, 包括故障的及时排查与应对、疑难问题的解决是保证接收机整体性能的基础.

2 接收机的运行及性能

德令哈13.7 m望远镜系统图见图2. 天线包含主面和副面, 分别由主面控制单元和副面伺服系统控制, 接收机分为前端与后端, 最后是数据存储单元. 天线接收到的信号传

输到9个波纹喇叭内,经9个2SB SIS混频器变频,叠加中频混合电桥后分离为18路的IF信号,再依次经LNA和HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)放大器进行功率放大后输出.该18路IF信号再经过后端的中频模块进一步处理后得到基频信号,由FFTS进行频谱实时分析.

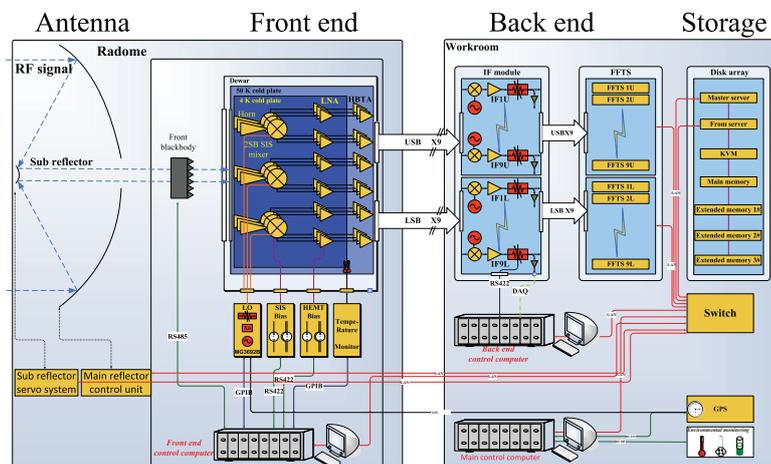


图 2 德令哈13.7 m望远镜系统示意图

Fig. 2 The system diagram of Delingha 13.7 m telescope

超导成像频谱仪前端工作在高真空、超低温的杜瓦内部.杜瓦内部由压缩机和制冷机配合制冷,制冷机连续工作时间达到1万小时时需要维护保养.另外,夏季雨水相对较多,对天文观测影响较大.综合这两方面考虑,在每年的7、8月,在实验室内对超导成像频谱仪进行测试、维护及器件更新,持续时间一个半月左右,称为“夏季维护”.

夏季维护是保证接收机整年良好工作的基础.接收机前端的杜瓦内部设备和器件检修更是重中之重.2SB SIS混频器及LNA的偏置线由144根低温漆包线构成,低温漆包线需要尽可能地减少杜瓦内部的热传导,线比较细且多根缠绕在一起,低温偏置线需要及时检查和更新,避免短路.用于中频信号传输的低温同轴电缆,经过近1 yr的低温工作及冷热循环后,容易出现裂缝,在夏季维护时也需要及时检修.LNA及HBT放大器经过低温工作和冷热循环后,需要测试以验证其性能和可靠性,对存在隐患的放大器及时更换并做好维修.图3是夏季维护工作中的一部分,对前端集成模块和2SB SIS混频器进行检修.

在完成设备及器件的检修和更新后,测试接收机的性能,确保接收机以最佳的工作状态开展天文观测.性能测试通常包含接收机噪声温度的测试,镜像抑制比测试,接收机稳定性测试及波束方向图测试等.

2.1 2SB SIS混频器工作状态

2SB SIS混频器是边带分离型超导混频器,SIS是指混频器内部超导隧道结的结构,即超导体-绝缘体-超导体.SIS结是超导隧道结,是用于混频的芯片.2SB SIS混频器内部包含2个性能一致的双边带超导(DSB SIS)混频器.DSB SIS混频器需要设定到最佳的偏置电压上,才具备高增益、低噪声的特性.为了使混频器能准确地设定在最佳偏置电压

上, 混频器采用4根偏置供电线, 2根用于供电并测量电流, 另2根用于测量相应的电压. 超导成像频谱仪的本振系统包含信号发生器、六倍频器、多个功分器. 实现1个本振信号分成18路供18个DSB SIS混频器使用. 最终耦合到18个SIS结上的本振功率会有一些的偏差, 但在实际应用中对2SB SIS混频器的性能影响并不明显.

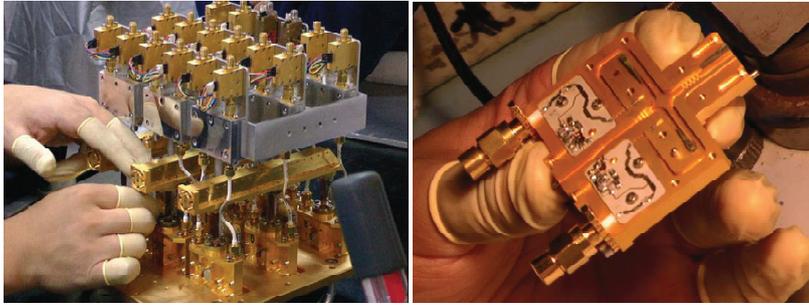


图3 前端集成模块(左)和2SB SIS混频器(右)的检修

Fig. 3 Maintenance of front integrated module (left) and 2SB SIS mixer (right)

2SB SIS混频器工作在杜瓦内部4 K冷板上. 在接近整年的连续工作中, 4 K冷板温度有一定的波动. 2SB SIS混频器最佳偏置电压点和器件性能与4 K冷板温度密切相关. 图4是杜瓦4 K冷板处温度在2016—2017年度的变化曲线. 其中, 第2000—5500 h基本处于冬季, 接收机外部的环境温度比较低, 4 K冷板处温度较低且波动小, 其他时间段环境温度较高, 4 K冷板温度较高且波动大. 另外, 由于制冷机随天线俯仰变化而改变方向, 制冷机制冷效率会变化, 最终导致4 K冷板温度随天线俯仰变化而波动. 为了减小4 K冷板温度变化对2SB SIS混频器性能的影响, 我们对2SB SIS混频器的电压偏置点实施自动化调整, 当4 K冷板温度变化超过0.1 K时, 重新设置最佳的电压偏置点.

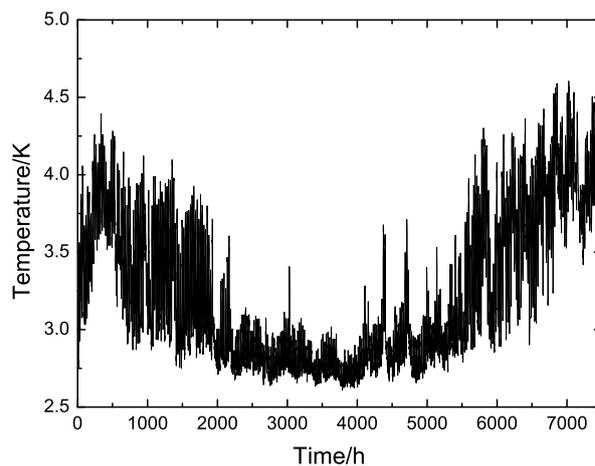


图4 杜瓦4 K冷板处温度变化

Fig. 4 Temperature change of Dewar 4 K cold plate

2.2 接收机噪声温度及望远镜系统噪声温度

接收机噪声温度是接收机最基本的参数之一,影响望远镜的灵敏度.接收机噪声温度采用Y因子法进行测试,通过测试杜瓦窗口前常温黑体和低温(液氮温度下)黑体时的接收机输出端总功率值计算.边带分离型接收机有上边带和下边带2个输出端口,在上边带端口使用Y因子法测试的接收机噪声温度称为 $T_{RX,USB}$,在下边带端口使用Y因子法测试的接收机噪声温度称为 $T_{RX,LSB}$.

图5是本振频率100 GHz时10 yr来的接收机噪声温度对比图.接收机上下边带的噪声温度多年来的平均值在55 K左右.由于接收机每年均需要进行夏季维护,部分器件会进行更换,接收机性能(噪声温度)本身会有所变化.另外,每年的测试条件不完全一致:杜瓦冷板的温度变化会影响器件的性能;2SB SIS混频器的偏置电压工作点和本振功率的强度会影响器件的性能;输出功率采用中频模块内部的检波器进行测试,而检波器的校准也会有一定的误差;测试低温黑体时承装液氮的泡沫盒外壁凝结水汽同样会影响测试结果.10 yr来数据整体来看,2011年和2014年的接收机噪声温度比其他年略微偏高,由于超导成像频谱仪没有整体改变,可知这两年接收机噪声温度偏高是测试误差造成的,这两年噪声温度可以略微向下修正.

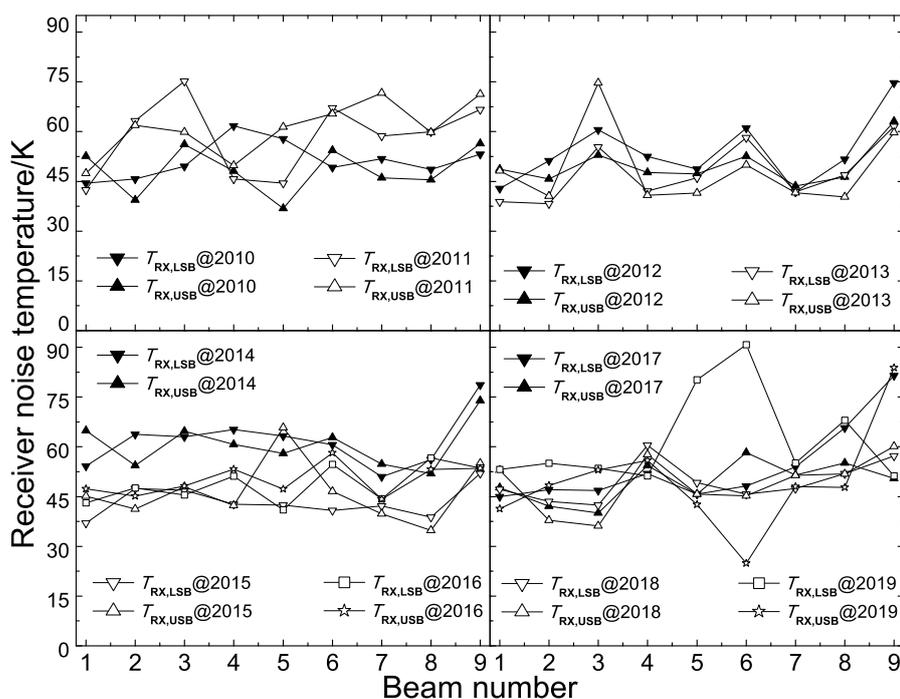


图5 本振频率100 GHz时10 yr来的接收机噪声温度对比图

Fig. 5 Comparison of receiver noise temperature in 10 years when LO frequency is 100 GHz

对图5中历年的接收机噪声温度进行对比分析.在2011年,第5、8、9像元的器件未做改变,接收机噪声温度比2010年略有增加.其他像元器件有改变,第1、3、4、6像元的2SB SIS混频器有调整,第2、7像元的LNA有改变.在2012年,第1、7、8像元的器件没有改变,第1像元接收机噪声温度变化不大,第7、8像元接收机噪声温度略有降

低. 第9像元的接收机噪声温度比其他像元略微偏高. 结合2010、2011、2012年未改变像元的数据, 同样可以得出结论: 2011年接收机噪声温度略微偏高是测试误差引起的. 在2013年, 第5、8像元器件没有改变, 接收机噪声温度变化很小; 第3像元上边带的接收机噪声温度偏高, 这是LNA造成的. 第9像元上下边带的LNA均有更换, 接收机噪声温度仍是略有偏高. 在2014年, 第3像元上边带LNA更换后, 该路的接收机噪声温度降低. 在2015年, 第5像元上边带的接收机噪声温度偏高, 是由新更换的LNA造成的. 在2016年, 第6像元的2SB SIS混频器有改变. 第4、8像元的2SB SIS混频器的外部磁场强度有增加. 第4、6、8、9像元的接收机噪声温度比其他像元略有偏高, 这4个像元的噪声温度偏高是2SB SIS混频器造成的, 外部磁场过强会引起2SB SIS混频器噪声变高. 在2017年, 改变最为严重的是第9像元, 下边带更换的LNA噪声更高, 导致该路接收机噪声温度明显偏高. 在2018年, 第9像元下边带LNA更换后, 该路噪声温度明显降低. 在2019年, 接收机噪声温度整体变化大. 这是因为中频混合电桥和2SB SIS混频器的偏置电路板均有改变^[16-17], 这两者会影响接收机信号和噪声的功率分配. 10 yr来数据整体来看, 第9像元的接收机噪声温度偏高主因是该像元2SB SIS混频器噪声高, 当叠加噪声高的LNA时, 该路接收机噪声温度比其他路明显偏高, 当叠加噪声低的LNA时, 该路接收机噪声温度与其他路差别不大. 2SB SIS混频器和LNA是影响接收机噪声温度的关键器件.

在天文观测时会测试望远镜的系统噪声温度来衡量望远镜整体噪声强度, 上边带的用 $T_{\text{SYS,USB}}$ 表示, 下边带的用 $T_{\text{SYS,LSB}}$ 表示. 当望远镜对准天空时, 接收机输出的功率为 P_{OFF} , 当接收机窗口前置常温黑体时, 输出的功率为 P_{CAL} , 则:

$$Y = \frac{P_{\text{CAL}}}{P_{\text{OFF}}}, \quad (1)$$

$$T_{\text{SYS}} = \frac{T_{\text{CAL}}}{Y - 1}, \quad (2)$$

其中, T_{CAL} 是常温黑体所处的环境温度, T_{SYS} 是上下边带系统噪声温度的统一表述, 在计算中忽略了小量, 表示接收机噪声和大气噪声等效到大气外的噪声温度. T_{SYS} 代表的噪声需要经过大气衰减和接收机的边带分离才能到达中频端.

将近年来本振频率为112.6 GHz (CO频段)、天线俯仰为70°左右、时间在12月左右且天气晴朗时的 T_{SYS} 进行统计分析望远镜的性能, 结果见图6. 统计的数据是在不同时间段, 天线俯仰、天气状态均不相同, 对比数据会有较大的误差, 但是仍具有重要参考意义. 整体来看, 上边带的系统噪声温度在210 K左右, 下边带噪声温度在130 K左右, 上边带信号的大气透明度比下边带的差. 结合大气透明度进行估算, 下边带接收机噪声温度与大气噪声温度的贡献比重相当, 在65 K左右, 上边带系统噪声温度中, 接收机噪声温度贡献80 K左右, 大气噪声温度贡献130 K左右, 大气噪声温度的贡献比重高于接收机的噪声温度. 当天线俯仰变小时, 接收机噪声温度和大气噪声温度贡献到系统噪声温度的量均会变大, 而大气噪声温度增长率高于接收机噪声温度. 以上的数据分析中, 大气噪声实际包含蒙皮衰减和准光损耗引入的噪声. 图7是1月的系统噪声温度与天线俯仰的关系图, 为9像元的平均值. 可以发现, 在高俯仰时, 系统噪声温度变化平缓, 在低俯仰时, 系统噪声温度随俯仰变低而迅速增高, 上边带表现得更为明显. 在低俯仰时, 大气厚度增加速度变快, 特别是大气透过率较差时, 大气噪声温度的贡献比重迅速增加.

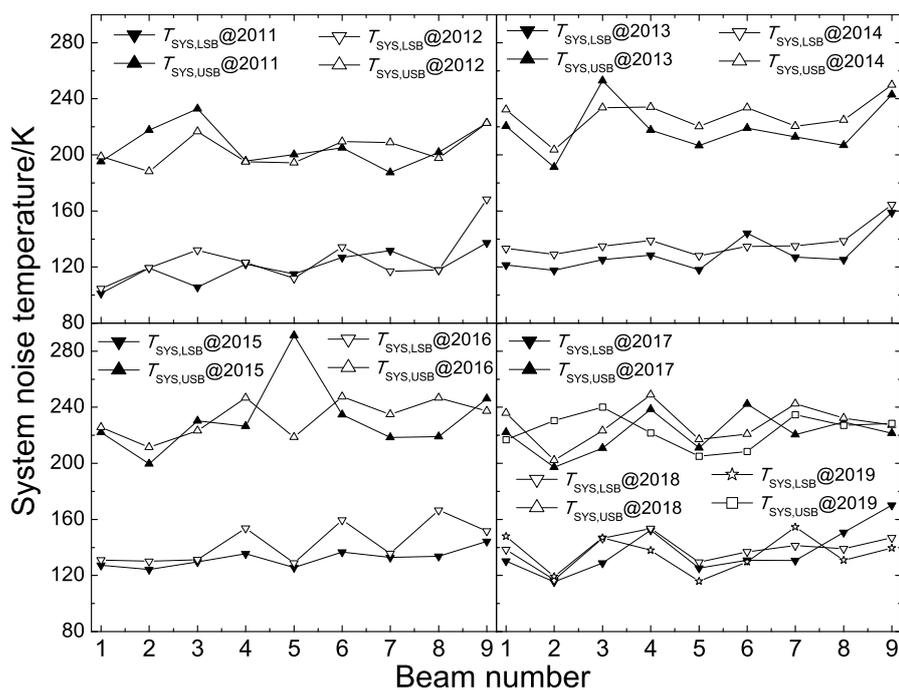


图 6 本振频率112.6 GHz时9 yr来望远镜系统噪声温度对比图

Fig. 6 Comparison of system noise temperature of telescope in 9 years when LO frequency is 112.6 GHz

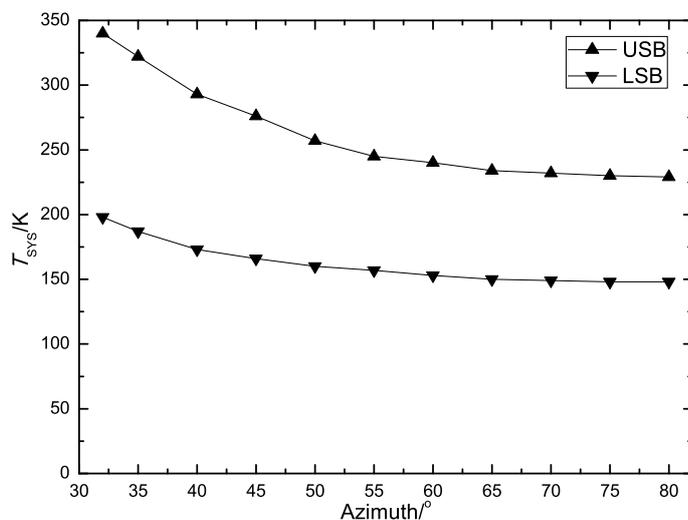


图 7 系统噪声温度与天线俯仰的关系

Fig. 7 The relationship between system noise temperature and antenna elevation

将图5的接收机噪声温度和图6的系统噪声温度相互比较可以发现,接收机噪声温度和系统噪声温度有一致性,可以相互印证.如2012年第9像元下边带,2013年第3像元的上边带,2014年第9像元的上下边带,2015年第5像元的上边带,相对应的接收机噪声温度和系统噪声温度均比其他像元偏高.在天文观测时,虽然不能直接测试接收机噪声温

度, 我们仍可以通过测试系统噪声温度来推测接收机噪声温度的变化, 反映接收机性能. 在2019年, 接收机噪声温度的差异并没有直观反映到系统噪声温度上, 原因与更换的中频混合电桥和2SB SIS混频器偏置电路板的关联性有待进一步的研究.

在天文观测时, 天线的俯仰平均低于 70° , 接收机噪声温度的贡献比重低于大气噪声温度, 在谱线观测时, 边带分离型接收机能够隔离镜像边带的大气噪声, 对信噪比的提高显得尤为明显. 多年来, 接收机噪声温度有所波动难以避免, 对天文观测的影响并不严重.

2.3 镜像抑制比

镜像抑制比(Image Rejection Ratio, IRR)是边带分离型接收机最基本的参数之一, 是隔离镜像边带噪声能力的表征. 边带分离是利用混合电桥的功率分配和相位转移功能, 及混频器对上下边带信号相位进行反转处理的功能实现的. 镜像抑制比无穷大时, 是理想的边带分离; 镜像抑制比等于1时, 是没有边带分离, 对应双边带接收机. 实际的边带分离型接收机, 由于功率分配不完全一致、相位转移与理想值有差异、两个混频器变频增益不完全相同等因素, 上下边带不能达到完全分离, 镜像抑制比值介于1和无穷大之间.

镜像抑制比的测试参考Kerr等人提出的测试方法¹. 在射频端, 分别输入上下边带的射频信号, 在不需准确测量输入信号强度的情况下, 测试接收机的镜像抑制比. 在此基础上, 针对超导成像频谱仪的特点, 我们减少了低温黑体的校准步骤, 简化了镜像抑制比的测试方法^[18]. 镜像抑制比在不同的本振频率和中频频率点上, 有很大的差异. 图8是不同的本振频率时镜像抑制比的对比图. 图中横轴是中频频率, 纵轴是第5像元上边带的镜像抑制比, 不同线型代表着不同的本振频率, 间隔0.1 GHz. 图中7个本振频率下, 只有112.6 GHz下的个别中频点对应的镜像抑制比低于10 dB, 其他频点均高于10 dB, 均值为15–20 dB. 图中还可以得到, 镜像抑制比随本振频率有一定的周期变化, 在本振频率为112.4 GHz时, 镜像抑制比最好, 向两边频率扩展时变差, 至112.6 GHz变为最差, 镜像抑制比随本振频率周期性变化, 半个周期的本振频率变化量为0.2–0.3 GHz.

在早期对接收机的镜像抑制比测试中, 采用安捷伦E4407B频谱仪进行测试, 对9像元输出信号逐路测试, 用时较长. 为了提高测试效率, 采用18路FFTS对9像元信号同步测试, 极大地节省了时间, 与采用安捷伦E4407B频谱仪测试结果基本一致. 在采用FFTS测试时, 相应的中频测试点需要避开FFTS频谱中的毛刺点. 由于FFTS是9路同步测试, 有的像元会出现输入信号过强, 导致FFTS频谱读出饱和现象; 有的像元会出现信号过弱, 信号被本底噪声淹没, 导致镜像抑制比测试偏小的情况. 因此, 适当的信号功率和中频输出功率是快速准确测试镜像抑制比的关键. 在测试程序中, 做好对信号强度的预判, 是避免测试结果出错的重要措施.

在2019年的夏季维护中, 中频混合电桥进行了更新, 新的中频混合电桥和旧的中频混合电桥的相位偏差由 90° 变为 -90° , 超导成像频谱仪的边带分离也有所变化, 之前的中频上边带端口变为下边带端口, 同样, 下边带端口变为上边带端口. 我们将后端进行了相应的调整, 对天文观测并没有影响, 镜像抑制比没有恶化.

¹Kerr A R, Pan S K, Effland J E. ALMA memo 357. "Sideband Calibration of Millimeter-Wave Receivers". <http://library.nrao.edu/public/memos/alma/main/memo357.pdf>

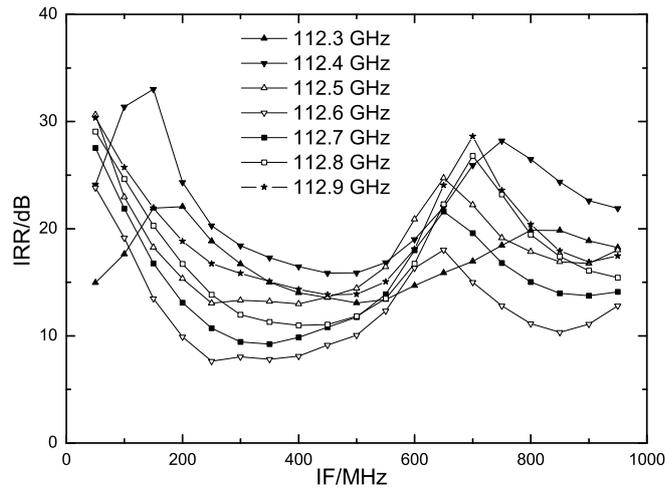


图 8 不同本振频率时镜像抑制比对比图

Fig. 8 Comparison of IRR at different LO frequencies

2.4 稳定性

天文观测通常需要对观测源进行积分以达到需要的信噪比. 如果接收机的噪声是随机噪声(白噪声), 则天文观测可通过增加积分时间不断提高信噪比. 但受增益波动的影响, 接收机在积分时间达到一定值后, 信噪比开始降低, 这是由接收机的稳定性决定的. 艾伦方差(Allan variance)是量化接收机稳定性的工具, 反映接收机增益波动. 在夏季维护期间, 我们测试每一路接收机的稳定性.

通过检波器得到18路接收机输出的总功率, 以约每点0.3 s的采样速率进行长时间的采样, 对数据进行艾伦方差计算, 便可得到接收机的稳定性. 超导成像频谱仪的稳定性在文献[19]进行了介绍. 这里我们对比了历年来的稳定性数据. 图9是以第5像元上边带为例, 超导成像频谱仪在研制时期以及天文观测以来的多年稳定性数据对比图. 2010年9月是研制时期在南京实验室的稳定性数据, 图中对比可以看到, 此时增益波动较小, 白噪声强度偏高. 在2010年12月, 此时超导成像频谱仪安装到德令哈13.7 m望远镜, 接收机稳定性急剧恶化, 经测试发现2SB SIS混频器的直流偏置供电中存在约100 Hz的干扰, 严重影响了2SB SIS混频器的稳定性. 随后, 对2SB SIS混频器的偏置供电采取了滤波措施, 在2011年的数据中, 接收机稳定性便有了明显的改善. 在2012年, 对2SB SIS混频器直流偏置供电做了进一步改进^[20], 接收机的稳定性进一步改善. 而在之后7 yr中, 接收机稳定性虽有一定差异, 但变化不大. 在整年的天文观测中, 接收机工作的环境温度波动大; 多波束接收机器件众多、排列紧凑、工作在封闭空间, 长时间工作后器件内部的温度升高且波动较大; 同时外部干扰的存在等众多因素造成接收机稳定性有一定的下降. 增加杜瓦内部冷板温度稳定性和减少器件增益随冷板温度变化的波动是改善超导成像频谱仪稳定性的两个重要方向.

2.5 波束性能及光轴定位

超导成像频谱仪的馈源是波纹喇叭天线, 其方向图对称性好、旁瓣低、频带宽. 波

喇叭天线是获得高质量高斯波束的关键器件. 波束性能测试用于检验喇叭的性能, 确定超导成像频谱仪的光路状态(如是否存在遮挡等现象), 定位超导成像频谱仪的光轴, 并用于固定超导成像频谱仪在望远镜上的安装位置.

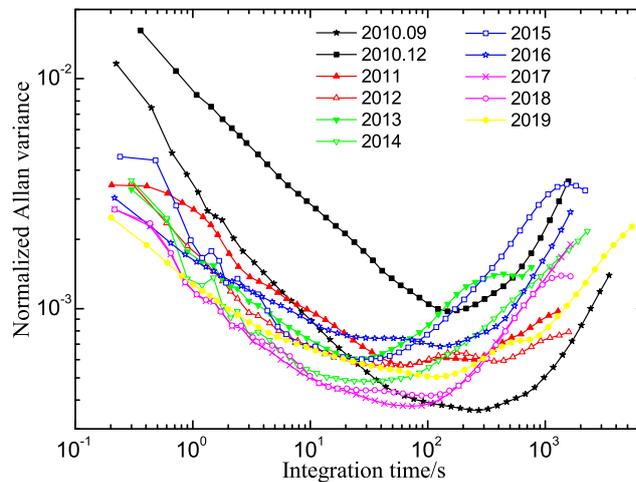


图9 多年来第5像元上边带的接收机稳定性

Fig. 9 The stability of USB receiver of the 5th pixel

波束性能测试通常在超导成像频谱仪窗口前两个不同距离上发射毫米波信号进行测试. 发射源采用方向图主瓣宽的矩形开口波导天线, 固定在一个横向和纵向均可移动的2维平台上. 测试平台见图10. 测试时尽可能将接收机和毫米波信号源之间用黑体覆盖, 避免多径传输引起的测试误差. 测试时将2SB SIS混频器的偏置电压设置在变频增益比较低的电压点, 增加信号强度的动态范围, 避免增益压缩引起的测试误差. 增加中频模块内部衰减量, 使接收机输出的总功率比较低, 避免后端放大器工作在非线性区及FFTS饱和, 提高输出信号的信噪比, 确保信号强度测试准确.



图10 波束性能测试图

Fig. 10 The test chart of beam performance

图11是设置不同的输出总功率时对应的波束图. 左图中由于接收机输出总功率设置得比较高, 表现出比较差的波束图形. 随后, 降低了接收机的输出总功率, 测试的波束性能变好, 如图11右图所示. 将图11中的Y轴数据展开后见图12. 可见接收机总功率较高时, 输出信号的信噪比较差, 信号强度值波动较大, 波束的一维方向图在整体上偏差不大, 但噪声过大导致波束形状有畸变. 因此在测试时注意设置较低接收机输出总功率, 保证得到高质量的波束形状, 其拟合的波束中心点也更为准确, 以保证接收机更好地与天线的准光契合.

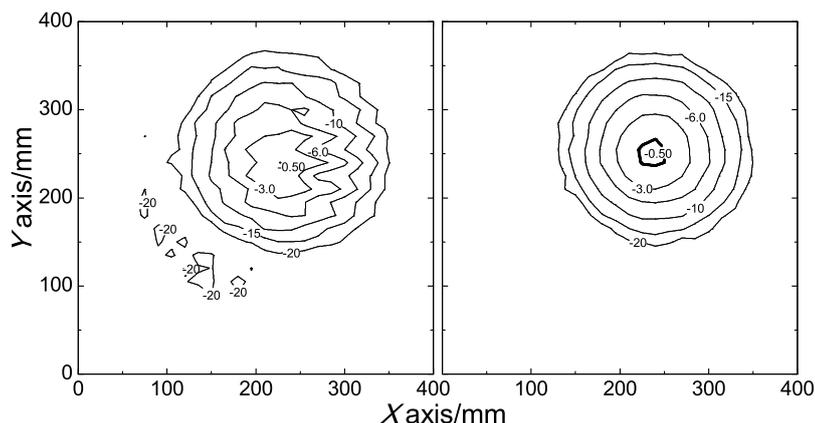


图 11 输出总功率不同时测试的波束图对比. 左图: 输出功率过高时; 右图: 输出功率降低后.

Fig. 11 Comparison of beam patterns tested at different output total power. Left panel: total output power is too high; Right panel: total output power is reduced.

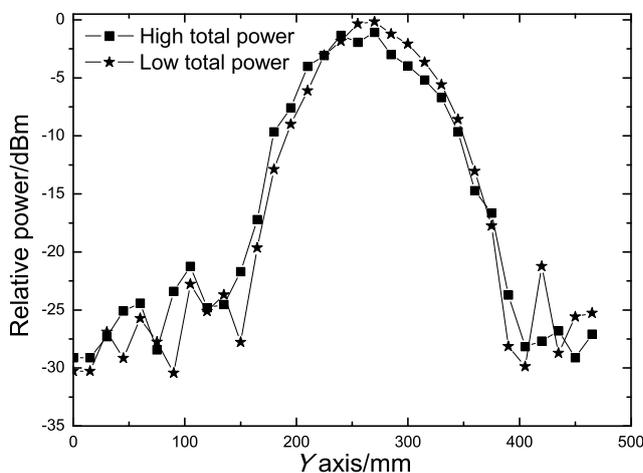


图 12 图11中Y轴的一维图

Fig. 12 One dimensional graph of Y axis in Fig. 11

对两个不同距离上的第5像元波束的中心点进行定位, 通过激光笔完成光轴位置的确定. 在安装超导成像频谱仪到望远镜时, 根据激光笔的入射光线和反射光线实现接收机和天线的准光契合.

在超导成像频谱仪安装到望远镜后, 在天线俯仰 38° 和 63° 时, 对金星进行2维扫描测试望远镜整体的波束性能, 见图13. 图中可见, 天线不同俯仰下, 望远镜的波束基本一致, 波束中心点有轻微的偏移, 这是因为望远镜的指向在不同俯仰下有很小的差异, 与天线的重力形变有关.

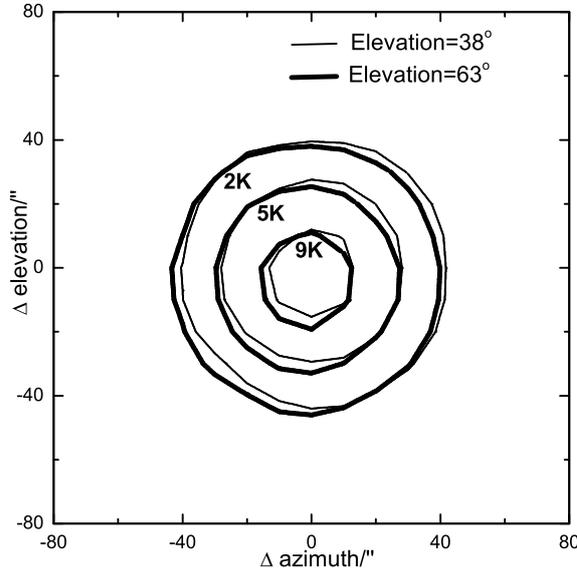


图 13 天线不同俯仰时, 望远镜的波束对比. 图中 $\Delta\text{elevation}$ ($\Delta\text{azimuth}$)是天线指向的位置与观测源实际位置的俯仰(方位)差.

Fig. 13 Comparison of the telescope beams in different elevation of the antenna. In the figure, $\Delta\text{elevation}$ ($\Delta\text{azimuth}$) is the elevation (azimuth) difference between the antenna pointing position and the actual position of the observation source.

2.6 谱线强度校准

不同望远镜观测的同一个天文信号源的强度是不同的, 甚至同一个望远镜在不同时间段观测到的强度也不同, 这是由望远镜的系统噪声温度、望远镜的效率、大气等因素不一致引起的. 射电天文强度校准就是通过建立一个温度标尺, 将接收机对射电源的强度响应转换为等效温度, 再结合天线相关参数转换为天文意义上的流量密度或亮度温度^[21]. 德令哈13.7 m望远镜采用斩波轮校准方法做谱线强度校准, 引入一个常温黑体为校准器件^[22].

射电源的天线温度为 T_A^* , 该值修正了接收机的增益和噪声、大气衰减及天线欧姆损耗等部分引入的差值, 归算在大气外, 表达式为:

$$T_A^* = \left(\frac{V_{\text{ON}} - V_{\text{OFF}}}{V_{\text{CAL}} - V_{\text{OFF}}} \right) T_{\text{CAL}}, \quad (3)$$

其中 V_{ON} 是望远镜对准射电源时的信号幅度, V_{OFF} 是望远镜对准天空背景时的信号幅度, V_{CAL} 是接收机窗口前遮挡常温黑体时的信号幅度.

射电源的辐射温度为 T_R^* , 是观测源实际的辐射亮度温度, 表达式为:

$$T_R^* = \frac{T_A^*}{\eta_M}, \quad (4)$$

其中 η_M 为主波束效率. 主波束效率与观测的频率、天线的俯仰、主副面的准光契合、面板精度有关. 主波束效率通过观测行星的强度并通过与行星的实际辐射亮温度对比得到. 在每年的正式天文观测前, 对常用射电信号频率的主波束进行效率测试. 为了修正天线重力变形和其他因素造成的主波束效率随俯仰的变化, 通常每年夏季维护完成后通过测试和拟合得到主波束效率与俯仰的关系. 首先, 测试不同俯仰下的行星(木星、金星等强度确定且可计算的点源)的 T_A^* . 之后, 与行星的实际辐射亮度温度对比得到不同俯仰下的主波束效率, 并通过von Hoerner-Wong公式拟合得到主波束效率计算参数^[23]. 最后, 在天文数据处理时, 根据主波束效率计算参数及von Hoerner-Wong公式计算不同俯仰下相应的主波束效率. 图14是115.3 GHz频率下的主波束效率与天线俯仰的关系图. 黑色点是实测值, 曲线是根据实测值及von Hoerner-Wong公式拟合得到的. 在天线俯仰约60°时主波束效率最高.

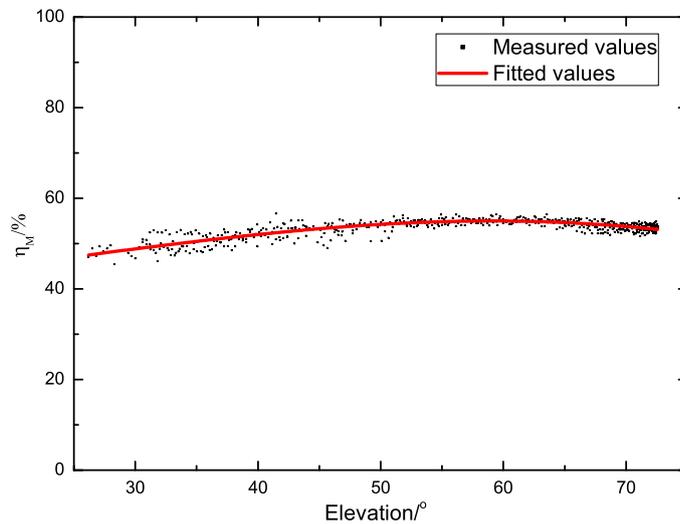


图 14 主波束效率与天线俯仰的关系

Fig. 14 Relationship between main beam efficiency and antenna elevation

超导成像频谱仪是9波束接收机, 当接收机安装时以中心波束(第5像元)为准做准光契合, 其他像元的波束会有一些的偏移, 加上其他因素的影响, 9个波束的主波束效率并不一致, 因此, 在强度校准时, 增加一个效率因子 η_B , 用于校准各波束之间的主波束效率的差异. 9波束的效率因子通常称为效率矩阵, 其中表1是2013—2014年CO3频率的效率矩阵.

3 接收机运行中的问题

超导成像频谱仪作为国际上第1例基于边带分离型超导混频器的多波束接收机, 其系统复杂, 目前已经连续运行了近10 yr, 在进行天文观测的运行中难免会出现不同的问题和故障, 这些问题及故障的排除和解决是保证超导成像频谱仪良好运行的关键, 也是

中国射电天文观测积累的宝贵财富.

表 1 2013—2014年的CO3频率下的9波束效率矩阵
Table 1 Efficiency matrix of 9 pixels at CO3 frequency in 2013—2014 season

| Pixel | USB (115.2 GHz) | LSB (110.2 GHz) |
|-------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.95 | 0.93 |
| 2 | 0.97 | 0.95 |
| 3 | 0.98 | 0.97 |
| 4 | 0.92 | 0.91 |
| 5 | 1.00 | 1.00 |
| 6 | 1.06 | 0.96 |
| 7 | 0.96 | 0.96 |
| 8 | 1.02 | 0.95 |
| 9 | 1.04 | 0.93 |

3.1 边带分离型超导混频器

边带分离型超导混频器是超导成像频谱仪的核心,一旦边带分离型超导混频器发生故障,上下边带2路接收机将同时无法工作.经过10 yr连续运行的考验,2SB SIS混频器的核心部分SIS结性能良好、工作稳定,并未出现损坏和故障,这也得益于良好的外围电路保护.超导混频器的外围电路器件多,低温偏置线相互缠绕,工作环境温度跨越了低温区到常温区,因此难免出现SIS结之外的部分引起的2SB SIS混频器故障.图15和图16是2SB SIS混频器故障时表现出来的异常现象.其中图15是SIS结的电压-电流曲线,红色是下边带(超导混频器实际是不分上下边带的,这里用上下边带仅仅区别2个超导混频器),其电压-电流曲线是正常工作状态,黑色点是上边带,其电压-电流曲线出现明显的异常,该故障是2SB SIS混频器的低温偏置线短路引起.低温偏置线是由多根漆包线缠绕在一起的,在低温状态下,漆包线的外部绝缘层会有部分裂开,在制冷机震动时,偏置线内部导体与杜瓦内器件外壳可能接触,出现短路现象,而接触是时断时续的,这与图15中上边带的电压-电流曲线表现一致.不短路时,电压正常;短路时,电压趋近于0;短路不完全时,电压在0和正常电压之间跳变.在夏季维护时,杜瓦内部恢复到常温状态,漆包线的外部绝缘层裂开部分因为热胀冷缩而重新复原,短路现象消失,因此很难测试到漆包线的短路点.图16是当2SB SIS混频器的偏置线出现短路不完全时,接收机输出总功率表现出的异常,其中红色线是其他像元的正常状态下曲线,黑色点是异常的总功率曲线.由于故障存在,2SB SIS混频器不能工作在最佳电压上,混频器的增益出现了波动,接收机总功率也随之波动.为了解决2SB SIS混频器的偏置线短路问题,在夏季维护时,我们更新了低温偏置线,减少多根漆包线的缠绕度,减少偏置线与杜瓦内器件外壳的接触点,对偏置线进行多点固定,减少偏置线随制冷机震动产生的抖动,在之后多年运行中,2SB SIS混频器偏置线短路现象未再出现.

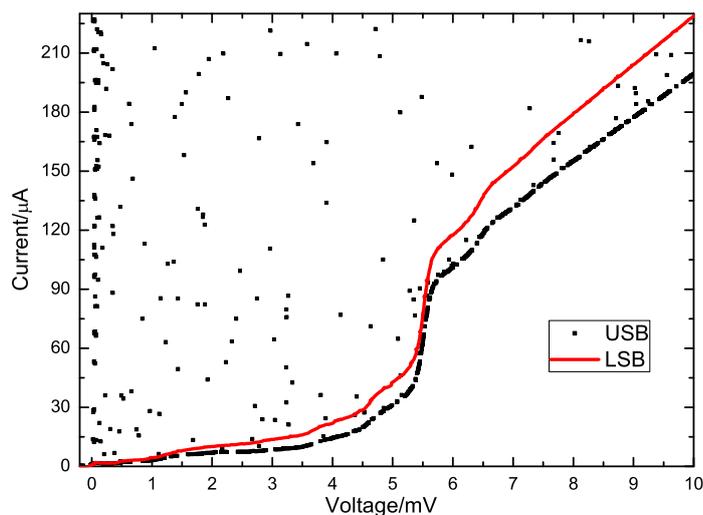


图 15 2SB SIS混频器故障时的电压-电流曲线

Fig. 15 Voltage-current curve of 2SB SIS mixer in case of failure

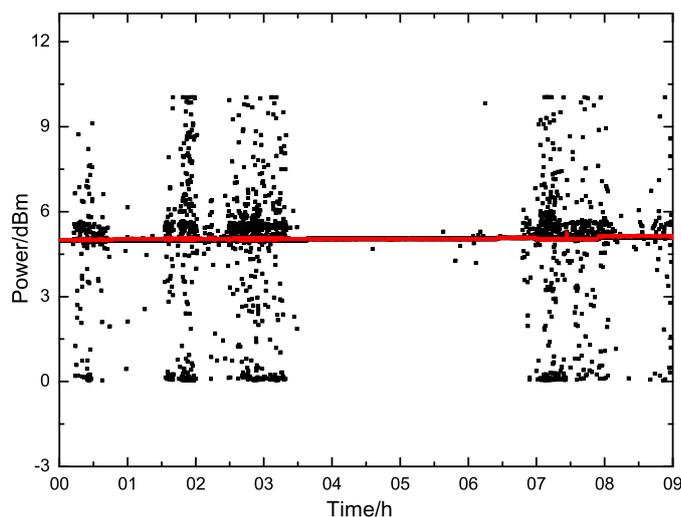


图 16 超导混频器故障时接收机总功率的时间曲线. 黑色点是异常的总功率, 红色线是正常状态下总功率.

Fig. 16 Time curve of the receiver total power when 2SB SIS mixer failure. The black dot is the abnormal total power, and the red line is the normal total power.

3.2 低噪声放大器和HBT放大器

低噪声放大器位于2SB SIS混频器之后, 其性能对接收机噪声温度有很重要的影响. LNA工作在杜瓦内部, 经受从常温到低温之间的多次冷热循环, 容易出现故障. 超导成像频谱仪有18个LNA, 单路LNA需要2个栅极和1个漏极供电, 包含地线共需要4根偏置线. 与2SB SIS混频器的低温偏置线类似, LNA的偏置线同样出现过短路现象. 除此之外, LNA也出现其他故障. 在冬季, 前端所处的圆堡内环境温度低至 -30° , LNA的偏置供电电源在该环境温度下由于温度过低出现故障, 导致LNA的偏置供电不稳, 之后对偏

置供电电源采取加热和保温措施, 该现象消失. LNA性能与工作平台温度关联性很大. 图17是杜瓦回温时, LNA工作平台4 K冷板温度从4 K升温到280 K时, LNA漏极端电流的变化. 图中, 黑色粗线是4 K冷板的温度曲线, 其他是18路的LNA的漏极端电流曲线. 图中可见, 粉红色曲线对应的LNA在回温中出现了故障. LNA在经过冷热循环后, 会出现无增益、增益减少、低温下无增益常温下增益正常、噪声变大等情况. 在检查时, 可以发现LNA器件内部出现微带线和供电线的焊盘焊点裂缝或断开, 微带线隆起引起断裂, 偏置线绑线脱开, 甚至芯片损坏等各种现象. 针对出现的情况, 需要对LNA进行性能测试, 选取稳定性比较好的LNA进行更换, 并对故障LNA进行维修.

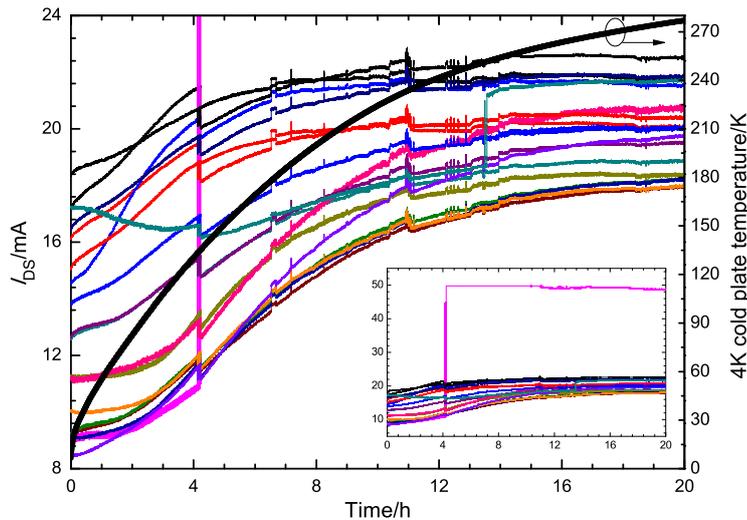


图 17 LNA漏极端电流随4 K冷板升温时的变化, I_{DS} 是漏极端电流值. 黑色粗线是4 K冷板的温度. 细线是18个LNA的 I_{DS} .

Fig. 17 The change of drain current of LNA with temperature rising of 4 K cold plate, I_{DS} is the drain current value. The black thick line is 4 K cold plate temperature. The thin lines are the I_{DS} of 18 LNAs.

HBT放大器工作在LNA后一级, 仍在杜瓦内部, 只需要+5 V的偏置供电. HBT放大器工作稳定, 很少发生故障. 仅在夏季维护阶段检查发现到接头处出现松动现象.

3.3 中频模块

中频模块属于超导成像频谱仪的后端, 共18路. 中频模块具有功率放大、滤波、变频、增益调整、检波等功能, 其中9路在一个中频箱内工作. 由于中频箱内器件过于集中, 加上长时间不间断工作, 中频模块是最易出现故障的器件. 最常见的现象是内部放大器故障, 引起中频模块没有增益. 其他如增益不稳定导致接收机频谱不稳和驻波现象; 内部屏蔽不好导致本振信号及其谐波信号泄漏现象; 用于增益调整的电调衰减器出现设置不到位, 不能准确设置输出功率的现象; 中频模块故障导致观测到的标准源强度变化的现象, 其原因在于检波器后的第3级放大器没有增益, 检波器未及时检测出中频模块增益的变化, 致使中频模块和FFTS没有工作在线性区域, 引起标准源的强度改变. 中频模块工作在室内常温环境, 出现的故障均能得到快速准确定位, 并及时更换备份模块, 并不会影响天文观测.

3.4 其他问题

前置黑体是信号强度的斩波轮法校准中使用的参考温标, 校准时, 前置黑体通过电机驱动到杜瓦窗口前, 接收机接收黑体辐射信号做参考温标. 之后, 前置黑体偏移到窗口外, 接收机接收天文信号. 在观测中, 前置黑体曾出现偏移不到位的现象, 在接收机输出的总功率监测曲线上很明显显示出来: 9像元之间的总功率差别很大. 原因是前置黑体的驱动电机内部润滑油由于工作环境温度低而凝结, 电机阻力过大. 之后对电机内部进行适当加热并增加电机的驱动功率, 此现象之后未再出现.

信号发生器是本振系统的基础信号源, 超导成像频谱仪9像元共用一个信号发生器. 信号发生器在低温环境下, 会出现失锁情况, 造成本振信号频率及功率不稳定. 对信号发生器采取保温措施后, 该现象消失.

与制冷机配套的压缩机是制冷系统必不可少的设备, 压缩机曾出现突然故障, 并且重新开机后无法工作的现象. 快速准确地切换新压缩机保证了天文观测不受影响. 通过维修, 发现内部的冷却剂减少, 压缩机降温效率降低, 导致压缩机停机保护.

杜瓦窗口是信号进入杜瓦的路径, 一侧是300 K左右的常温, 另一侧是低温, 窗口内外壁的温差大, 外壁容易凝结水汽使信号有衰减, 导致望远镜系统噪声温度升高. 为了解决该问题, 采用风扇来增加窗口的空气流动性, 减少杜瓦窗口水汽的凝结.

4 更新发展

4.1 控制程序的优化

13.7 m望远镜的控制程序采用分布与集中相结合的操作方式. 望远镜的操作系统、超导成像频谱仪的前端和后端系统、FFTS的数据处理系统均是独立的计算机程序控制, 而这些控制程序均受主控计算机的程序控制. 主控计算机监测整个望远镜的工作状态, 判断望远镜整体的工作性能, 实时发出故障和错误警报, 以保证天文观测的可靠性. 在多年的天文观测中, 对遇到的各种异常问题进行总结, 并让主控计算机能够识别判断及时给出警报. 如天气的状态、系统噪声温度、2SB SIS混频器的偏置电压和本振驱动功率、接收机总功率的强度范围及波动等一系列与望远镜有关的参数. 控制程序的优化是一个长时间不断累积的过程, 是望远镜自动化观测和天文数据可靠性产出的保障.

4.2 数控衰减器的引入

在超导成像频谱仪投入到天文观测的初期, 本振信号通过手调衰减器调整信号强度以适应2SB SIS混频器的驱动功率需求. 当观测频率切换时, 本振信号的频率可通过信号发生器自动切换, 而本振信号的功率则需手动调整, 占用了天文观测的时间. 之后, 我们在本振系统中引入了数控衰减器, 当观测频率切换时, 本振信号的功率通过数控衰减器自动化调整, 减少了人为调整引入的功率偏差, 减少了操作时间, 提高了天文观测的效率.

4.3 2SB SIS混频器预放大电路的更新

2SB SIS混频器预放大电路是2SB SIS混频器偏置供电的一部分, 用于混频器偏置线滤波、输出电压放大、SIS结保护等功能. 在早期的版本中, 预放大电路及封装盒存在封

装繁琐、操作困难、接头对位不准、出现问题时不易排查(18路的主功能电路集中在一个电路板上)等缺点. 针对这些缺点, 对预放大电路及封装盒进行了改进和优化, 将18路的主功能电路分置到3个独立的电路板上, 易于排查问题; 将封装结构简单化, 易于操作; 改善了偏置线的滤波性能, 2SB SIS混频器的偏置电压稳定性得到改善; SIS结的保护电路也得到了进一步改进. 2SB SIS混频器10 yr的工作中没出现大的故障, 得益于这一部分良好的工作.

4.4 稳幅稳相电缆的引入

超导成像频谱仪的前端信号通过18根同轴电缆传输到后端, 这18根电缆会从望远镜的平台一直延伸到工作室. 在进行天文观测时, 18根电缆会随天线转动, 信号会随之波动, 接收机稳定性变差. 在天线平台我们引入了稳幅稳相电缆, 减少了天线转动造成的信号波动, 提高了接收机的稳定性.

4.5 其他

针对接收机的中频干扰问题, 我们优化和改进了中频混合电桥和2SB SIS混频器^[16-17], 并对前端控制计算机、本振系统的信号发生器、中频模块采取了电磁屏蔽措施. 我们发现信号发生器的谐波信号能够耦合到接收机中, 形成窄带干扰信号^[24], 信号发生器的基底噪声能够耦合到接收机中, 增加接收机噪声温度^[25-26]. 通过在信号发生器的输出端增加可调频率的窄带滤波器滤除或减小谐波信号及基底噪声. 在夏季维护和超导成像频谱仪进行天文观测的开关机阶段, 我们建立了良好的接收机状态记录标准, 用于判断接收机不同时刻的状态, 定位接收机出现故障的时间和原因. 我们采取多项措施, 提高压缩机和制冷机的制冷效率, 优化杜瓦内部4 K冷板的温度稳定性. 对工作在圆堡内的设备及器件, 在冬季采取加热和保温措施, 保证设备和器件的稳定工作. 在圆堡内部建立多点温度监视网络, 避免圆堡蒙皮结冰或结霜现象.

5 结论

在超导成像频率仪10 yr的天文观测中, 始终保持高效、稳定的工作, 不间断地开展天文观测, 而在运行中产生的问题也能快速准确地解决. 德令哈13.7 m望远镜所处的青海观测站地处高原, 昼夜及整年的温度变化大, 设备和器件需要考虑环境温度的适应性. 特别在冬季, 环境温度低, 许多设备在不采取保温措施下, 容易故障. 在圆堡内工作的设备, 需要考虑寒冷环境下的工作性能, 并及时做好相关的保温措施.

良好的监视制度, 是望远镜常年稳定运行的另一大基础. 计算机通过数据采集能准确分析定位望远镜的状态, 做到实时监视和报警. 工作人员时常巡视, 对设备和器件的工作状态时常关注, 检查设备的工作状态也是必不可少的.

超导成像频率仪是一个系统复杂的多波束接收机, 超导成像频率仪内任何器件的故障均会导致观测效率的降低, 超导成像频率仪的运行需要全面维护和性能测试来保障. 技术的革新和新方法的应用是提高接收机效率的关键, 作为一个以观测、维护为主的观测站, 同样也要围绕提高接收机效率开展相关的研究工作.

承前启后, 我们在过去的10 yr中, 已将超导成像频谱仪维护好、使用好, 总结经验规律, 更要在以后将新一代大规模接收机研制好、维护好、使用好.

致谢 德令哈13.7 m望远镜良好的天文观测和超导成像频谱仪的稳定运行是工作在中国科学院紫金山天文台青海观测站全体人员共同努力的结果,也得到了天文届同行的大力支持和青海省、海西蒙古族藏族自治州、德令哈市地方政府的帮助,这里一并感谢。感谢审稿老师和编辑老师提出的宝贵意见,使得文章质量有了显著提高。

参 考 文 献

- [1] Wilson T L, Guilloateau S. Millimeter Astronomy. Berlin Heidelberg: Springer, 2018
- [2] Shan W L, Yang J, Shi S C, et al. ITTST, 2012, 2: 593
- [3] 杨戟, 曹凝. 中国科学院院刊, 2011, 26: 478
- [4] Sun Y, Xu Y, Yang J, et al. ApJ, 2015, 798: L27
- [5] Sun Y, Su Y, Zhang S B, et al. ApJS, 2017, 230: 17
- [6] Sun Y, Xu Y, Chen X, et al. ApJ, 2018, 869: 148
- [7] Su Y, Yang J, Zhang S B, et al. ApJS, 2019, 240: 9
- [8] Xiong F, Chen X P, Zhang Q Z, et al. ApJ, 2019, 880: 88
- [9] Wu Y F, Liu T, Meng F Y, et al. ApJ, 2012, 756: 76
- [10] Liu T, Wu Y F, Zhang H W. ApJS, 2012, 202: 4
- [11] Yang W J, Xu Y, Chen X, et al. ApJS, 2017, 231: 20
- [12] Liu B, Chen Y, Zhang X, et al. ApJ, 2017, 851: 37
- [13] Xu J L, Xu Y, Yu N P, et al. ApJ, 2017, 849: 140
- [14] Xu J L, Xu Y, Jiang P, et al. ApJ, 2020, 893: L5
- [15] Tang M Y, Liu T, Qin S L, et al. ApJ, 2018, 856: 141
- [16] 李振强, 李积斌, 张旭国, 等. 天文学报, 2019, 60: 24
- [17] Li Z Q, Li J B, Zhang X G, et al. ChA&A, 2019, 43: 590
- [18] 李振强. 3mm频段边带分离型超导混频接收机的实验研究. 南京: 中国科学院研究生院, 2010
- [19] Shan W L, Li Z Q, Shi S C, et al. 2010 Asia-Pacific Microwave Conference. Yokohama: IEEE, 2010: 477
- [20] 李振强. 多像元超导混频器偏置放大及SIS结保护电路的保护装置: ZL201721429942.7. 2018-07-10
- [21] 王凯, 王洋, 陈卯蒸, 等. 天文学报, 2020, 61: 1
- [22] 杨戟. 天体物理学报, 1999, 19: 55
- [23] von Hoerner S, Wong W Y. ITAP, 1975, 23: 689
- [24] 李振强, 张旭国, 李积斌, 等. 天文研究与技术, 2020, 17: 60
- [25] 李振强, 张旭国, 李积斌, 等. 天文学报, 2020, 61: 18
- [26] Li Z Q, Zhang X G, Li J B, et al. ChA&A, 2020, 44: 383

Operation of Multibeam Receiver of Delingha 13.7 m Telescope

LI Zhen-qiang^{1,2} ZHANG Xu-guo^{1,2} XU Ye^{1,2} ZUO Ying-xi^{1,2} LI Ji-bin^{1,2}
SUN Ji-xian^{1,2} LU Deng-rong^{1,2} JU Bing-gang^{1,2} ZHANG Hai-long^{1,2}
JIN Feng-juan^{1,2} LUO Chun-sheng^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)

ABSTRACT Delingha 13.7 m telescope is one of the most important radio telescopes in China. Since installing superconducting spectroscopic array receiver (SSAR) and adopting On The Fly (OTF) observation mode, the telescope has operated for nearly 10 years. During this period, a large number of astronomical observation projects have been carried out and completed, a large amount of astronomical data has been observed, and a series of important scientific research results have been achieved. This paper introduces the operation status of SSAR in astronomical observation, the problems in operation, the phenomena of faults and solutions. The performance test and performance analysis of SSAR are described in detail, including receiver noise temperature and telescope system noise temperature, image rejection ratio (IRR), receiver stability, beam performance and so on. The update and development of SSAR is listed, including the automatic adjustment of LO (Local Oscillator) power, the updating of pre-amplification circuit of sideband separation superconducting mixer, and the optimization of control program, etc. This paper summarizes the experience and rules, and connects the past with the future, and applies the experience of maintenance and operation of SSAR to the next generation of large-scale receiver system.

Key words radio astronomy, multibeam receiver, receiver noise, sideband separation, superconductor-insulator-superconductor mixer