

VLBI测轨的S/X致冷接收机技术

李斌¹, 仲伟业¹, 王生旺², 张立军³, 梁世光¹

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国电子科技集团公司第十六研究所, 合肥 230088;
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 高灵敏度致冷接收机是提升我国探月工程VLBI测轨精度的关键设备。我国自主研发的S/X致冷接收机采用了双频馈源网络、致冷极化器、HEMT (High Electron Mobility Transistor) 致冷低噪声放大器、超导滤波器核心技术, 实现了S/X双频信号的同时同目标高灵敏度接收。介绍了接收机系统设计及分部件研制情况, 并对接收机噪声和系统噪声进行了实测。结果表明, S波段接收机频带2.19~2.3 GHz, 接收机噪声温度8 K, 天顶方向系统噪声温度53 K, X波段接收机频带8.2~9.0 GHz, 接收机噪声温度13 K, 天顶方向系统噪声温度32 K, 很好地完成了我国探月工程VLBI测轨任务。

关键词: 致冷接收机; 极化器; 噪声温度; 低噪声放大器

中图分类号: P164

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)04-0347-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200029

引用格式: 李斌, 仲伟业, 王生旺, 等. VLBI测轨的S/X致冷接收机技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 347-353.

Reference format: LI B, ZHONG W Y, WANG S W, et al. S/X cryogenic receiver technology for VLBI satellite tracking[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 347-353.

引言

在月球和太阳系内行星际探测任务中, 2万km以远的探测器变轨和捕获等重要弧段需要借助VLBI提供高精度测角数据^[1-2]。VLBI射电望远镜必须具备优良的探测灵敏度, 有助于提升对探测器临近标天体射电源的观测机率^[3], 同时保证接收探测器测控和数传信标的信噪比, 减少VLBI台站设备引入的测量误差, 进而提升探测器测角精度^[4]。

射电望远镜的探测灵敏度由天线有效接收面积G和系统噪声T的比值决定, 即G/T值。G值与天线口径和天线效率相关, 国际上使用VLBI技术开展测轨工作的大型设备有美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)深空站34 m和70 m口径天线, 以及欧洲航天局(European Space Agency, ESA)深空站35 m口径天线^[5]。系统噪声温度T由宇宙背景辐射、大气噪声、天线噪声和接收机噪声等构成, 在天线有效接收面积不变的前提下, 通过降低接收机噪声温度从而改善系统噪声温度, 是提升射电望远镜VLBI探测灵敏度的重要途径。

接收机是探月工程VLBI测轨分系统台站的重要设

备, 致冷接收机是将接收机前级器件置于15 K(约-258 °C)至绝对零度环境中工作的低温电子学技术, 无源器件引入的热噪声随环境温度成比例下降, 有源器件噪声温度在超低温环境下相对于常温状态可以降低近一个量级, 从而大幅度改善系统噪声温度T值^[6]。国际上的技术发展历程从20世纪70年代工作在4 K温区的红宝石量子放大器为核心的S波段致冷接收机开始, 到80年代出现并在90年代趋于成熟, 并得到推广应用的, 工作在15 K温区的HEMT放大器为核心的X波段和Ka波段致冷接收机^[7]。目前国际上投入使用的大多数是单频接收机, 美国和欧洲深空网使用S和X两台单频收发设备, 通过天线的波束波导结构和光路上设置频率选择面将S和X波段分离, 实现双频同目标上行发射链路和下行接收链路的复用。由于其天线光路系统复杂, 而且多镜面带来驻波恶化和噪声增加, 对于仅保留下行接收功能的VLBI测轨双频接收机来说并不是最优设计。

为了满足VLBI在月球与深空探测中对于极限灵敏度的需求, 我国自主研发的S/X致冷接收机采用了双频馈源网络、致冷极化器、HEMT (High Electron Mobility Transistor) 致冷低噪声放大器、超导滤波器

氢原子钟作为时间与频率基准, 它的10 MHz输出信号作为接收机变频本振的外部参考, 兼顾良好的相位噪声和长期稳定度性能。采用双级型G-M氦气闭环制冷系统提供15 K和77 K两种冷量, 15 K冷量冷却低噪声放大器核心器件, 77 K冷量冷却热屏蔽罩, 减少常温杜瓦外壁对工作在15 K温区器件的热辐射, 维持稳定的低温环境。S/X致冷接收机系统设计以降低系统噪声为目标, 对双频馈源网络、低温前端、致冷低噪声放大器以及超导滤波器等接收机噪声主要贡献部件开展重点优化设计。

2 主要部件设计

2.1 双频馈源网络技术

VLBI测轨的S波段和X波段最高频率和最低频率相差4倍以上, 相对带宽约为10%, 馈源采用了单槽波纹喇叭结构, 利用波纹壁导纳的周期性实现双频共用, 结构上分为5段, 自上而下分别为辐射段、变角过渡段、变频过渡段、模式转换段和光壁过渡段。网络部分采用了双频单收结构, 首先通过S/X分波器进行信号分离, S波段信号由波导缝隙结构从侧面耦合到4个矩形弯波导, 再通过S波段滤波器、连接波导与合路器将信号重新合成, 最终通过位于底部的隔板极化器输出S波段左旋圆极化和右旋圆极化信号, X波段信号直通经过S/X分波器和圆波导变径, 通过隔板极化器输出X波段左旋圆极化和右旋圆极化信号。双频馈源网络在结构和工艺上充分考虑了低噪声特性, S波段插入损耗好于0.15 dB, X波段插入损耗好于0.25 dB, 结构示意图如图2所示。

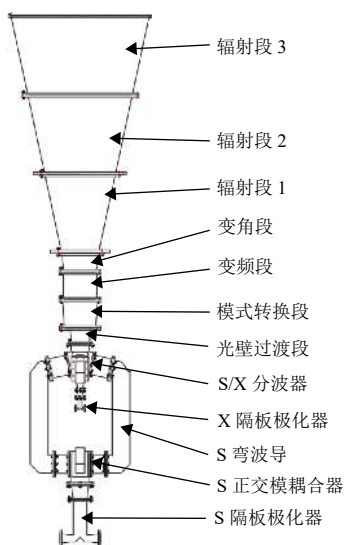
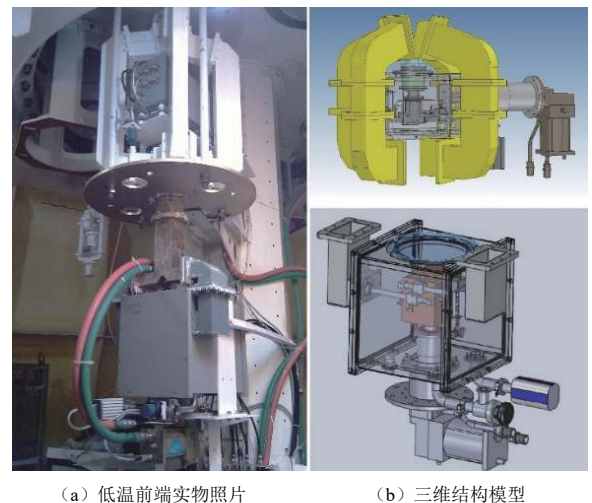


图2 S/X双频馈源网络结构示意图

Fig. 2 Architecture diagram of S/X dual-band feed and polarizer

2.2 低温前端技术

低温前端 (Cryogenic Front End) 与馈源网络的连接, 为前级微波器件提供低温真空环境, 并将低噪声放大后的接收信号输出给后级常温变频单元。S/X致冷接收机包含S波段和X波段两个独立的低温前端。图3(a)是低温前端实物照片, X波段低温前端被包裹在4个S波段波导壁中, S波段低温前端位于S常温圆极化器下方, 图3(b)是对应的三维结构模型。S波段低温前端输入接口为两个标准BJ-22波导口, 波导同轴探针位于具有真空密封和微波透明传输特性的定制薄壁石英罩内, 通过110 mm的不锈钢薄壁同轴传输线实现常温至15 K的温度过渡并连接固定在低温平台的定向耦合器、超导滤波器和致冷低噪声放大器, 输出端使用不锈钢同轴电缆实现15 K至常温的温度过渡。



(a) 低温前端实物照片

(b) 三维结构模型

图3 S/X低温前端照片和三维模型

Fig. 3 Picture and 3D modules of S/X-band cryogenic front end

X波段低温前端采用了极化器致冷技术^[8], 输入接口为28 mm直径圆波导, 采用专用薄膜结合低损耗高密度泡沫支撑实现真空密封和微波透明传输, 通过0.2 mm间距的波导缝隙隔热组件实现常温至15K的传导热隔离, 进而连接置于15 K低温平台的X波段波导圆极化器、定向耦合器和致冷低噪声放大器, 输出端同样使用不锈钢同轴电缆实现温度过渡和信号传输。

图4给出了S波段低温前端的噪声测量结果, 测量参考面为输入矩形波导口, 平均噪声温度8 K, 而同频段商用常温设备的噪声水平约为50 K, 致冷接收机技术的应用将灵敏度提升6倍左右。图5给出了X波段低温前端的噪声测量结果, 测量参考面为极化器输入圆波导口, 平均噪声温度13 K, 而同频段商用常温设备的噪声水平约为100 K, 致冷接收机技术的应用将灵敏

度提升8倍左右。由此可见,致冷接收机技术对于设备灵敏度提升效果明显,并且随着频段的升高优势更加突出。

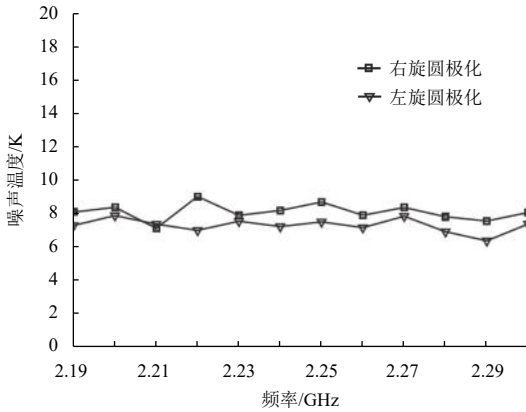


图4 S波段低温前端噪声温度实测结果

Fig. 4 Receiver noise of S-band cryogenic front end

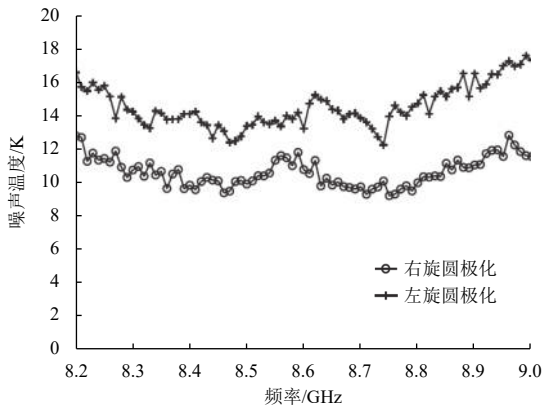


图5 X波段低温前端噪声温度实测结果

Fig. 5 Receiver noise of X-band cryogenic front end

2.3 致冷低噪声放大器技术

低噪声放大器作为接收机第一级有源器件,其噪声特性对于接收系统灵敏度起决定作用。S/X低噪声放大器采用了分立HEMT场效应管、微带匹配电路、直流偏置电路构成的混合集成方式,图6给出了X波段致

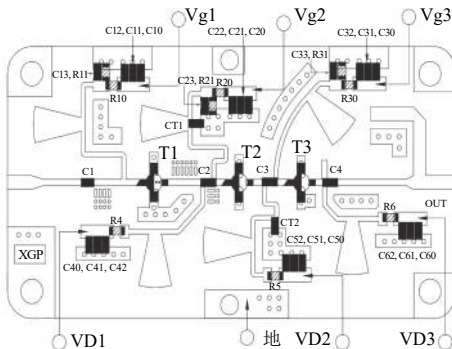


图6 X波段致冷低噪声放大器电路版图

Fig. 6 Circuit diagram of X-band refrigeration low noise amplifier

冷低噪声放大器的电路版图。低噪声放大器的等效噪声温度主要取决于首级放大管。将放大管看作一个有源二端口网络,它的噪声温度 T_n 可以表示为

$$T_n = T_{\min} + T_0 \times \frac{g_n}{R_s} \left[(R_s - R_{\text{opt}})^2 + (X_s - X_{\text{opt}})^2 \right] \quad (1)$$

噪声温度是由最小噪声温度 T_{\min} ,以及放大管最佳噪声阻抗 $R_{\text{opt}} + jX_{\text{opt}}$ 与输入电路阻抗 $R_s + jX_s$ 的匹配程度决定的。根据HEMT等效电路模型,最小噪声温度 T_{\min} 表示为

$$T_{\min} = K \cdot \omega \cdot C_{\text{gs}} \cdot \sqrt{\frac{t(R_g + R_s)}{g_m} + \frac{K_r}{g_m^2}} \quad (2)$$

其中: R_g 和 R_s 是栅极和源极的寄生电阻; g_m 是跨导, K 和 K_r 是噪声系数, $t = T_a/290$, T_a 是环境物理温度。

在15 K低温环境下, $t \approx 0.05$, K_r/g_m^2 对于最小噪声温度起决定性作用,跨导 g_m 增加,斯托克斯电势增加并导致 C_{gs} 的小幅减小,寄生电阻由于金属特性会大幅度减小^[9]。因此,HEMT放大管在低温环境下噪声会大幅下降,而它的增益会有小幅增加,非常适于低温电路设计。放大器电路设计采用源极负反馈技术使最佳噪声源阻抗 $R_{\text{opt}} + jX_{\text{opt}}$ 与源阻抗 $R_s + jX_s$ 更接近,在实现低噪声指标的同时兼顾输入端口的功率匹配。

表1给出了两款致冷低噪声放大的性能指标,在15 K环境温度下,S波段噪声温度为5 K,X波段噪声温度为8 K,仅为同类常温器件噪声温度的1/10,30 dB以上的增益可以有效抑制接收机后级器件的噪声贡献,-5 dBm的输出1 dB压缩点性能保证了器件良好的动态范围,满足月球与深空探测器测控信标的高动态无失真接收。

表1 致冷低噪声放大器指标

Table 1 Specifications of cryogenic LNAs		
波段	S波段	X波段
频率范围/GHz	2.19~2.3	8.2~9.0
低温噪声温度/K	5	8
增益/dB	30	30
输入回波损耗/dB	-10	-10
输出回波损耗/dB	-15	-15
P1dB/dBm	-5	-5
功耗/mW	50	70

2.4 超导滤波器技术

为了消除第三代移动通讯信号对S波段接收机的影响,保证链路动态范围和系统灵敏度,在致冷低噪声放大器之前设计了工作在15 K温区的超导带通滤波

器^[10]。超导材料选用钇钡铜氧 ($Y^1Ba^2Cu^3O^{7-\delta}$)，其转变温度在91 K，零电阻温度在89 K，介质基片采用氧化镁单晶基片，经镀膜、光刻、保护、组装等工艺流程后，制作成为超导滤波器模块。根据带外抑制制度需求，滤波器微带电路采用了17阶交指结构，封装后器件长度40 mm，实物照片如图7所示。

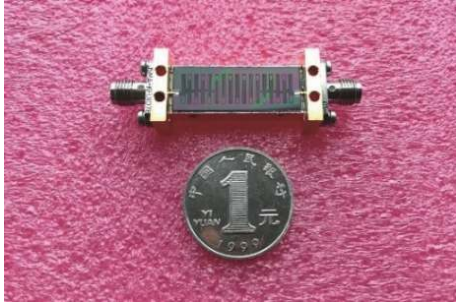


图 7 超导带通滤波器照片
Fig. 7 Picture of superconducting band-pass filter

图8给出了15 K环境温度下的器件传输特性和反射特性，通带为2.19~2.3 GHz，通带内反射损耗小于-25 dB，频偏在0.1 GHz和0.2 GHz的2.18 GHz与2.17 GHz频点处的带外抑制制度达到40 dB和90 dB，实测超导带通滤波器引入的接收机噪声增加值小于1 K。

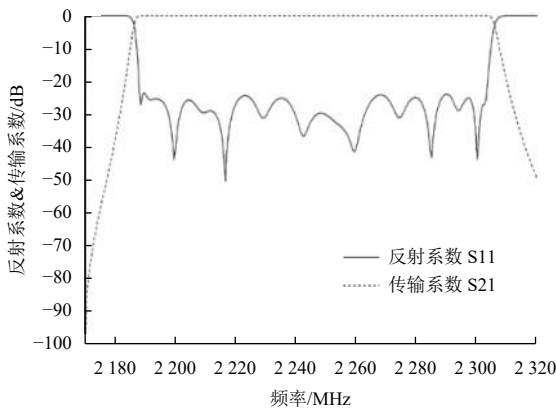


图 8 超导滤波器传输和反射特性测量结果
Fig. 8 Measured results of superconducting BPF

3 系统噪声测量与分析

系统噪声温度由馈源口面以下的接收机噪声温度和馈源口面以上的天线噪声温度构成，其中天线噪声温度包含了宇宙微波背景辐射、大气噪声以及由于馈源溢出效率造成的地面噪声贡献^[11]。受大气不透明度影响，系统噪声温度随天线仰角变化，在天顶方向最小，采用常温黑体作为热负载和冷空作为冷负载的Y因子法进行系统噪声温度测量。图9给出了S波段天顶方向的系统噪声测量结果，两个极化通道的平均值

为53 K，对应噪声系数约为0.74 dB，相对于同频段常温系统的灵敏度提升约一倍。由于S波段带内仍残留有微弱的外界无线电干扰信号，在接收机朝向天顶冷空时可见干扰信号频谱，接收机馈源口面覆盖常温黑体时干扰信号被黑体吸收，干扰信号频谱消失，经两次频谱计算而来的系统噪声在2.23 GHz和2.3 GHz的干扰频点出现窄带突跳点，并非S波段接收机自身产生。图10给出了X波段天顶方向的系统噪声测量结果，两个极化通道的特性一致，平均值为32 K，对应噪声系数约为0.45 dB，相对于同频段常温系统的灵敏度提升约4倍。

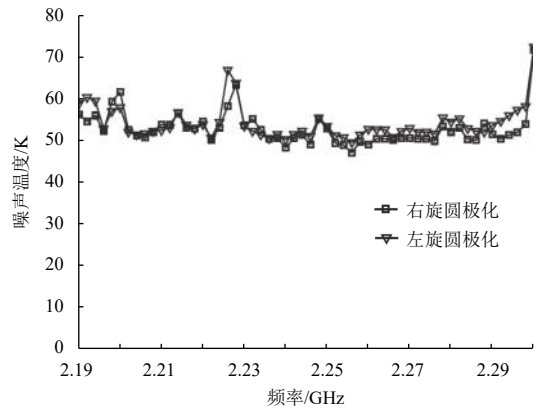


图 9 S波段天顶方向系统噪声
Fig. 9 S-band system temperature at Zenith

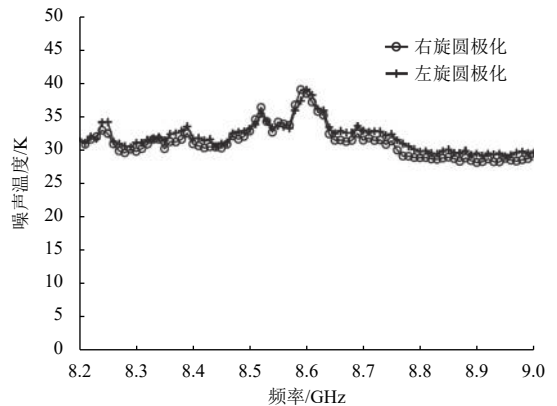


图 10 X波段天顶方向系统噪声
Fig. 10 X-band system temperature at zenith

为了验证系统噪声实测结果的合理性，同时评估接收机各分部件对于整机系统噪声的贡献，给出了天顶方向系统噪声的指标分配表，如表2所示。宇宙背景辐射和大气噪声采用对应频段的理论值。由于S波段波长较长，双频馈源S波段的旁瓣和后瓣引入天线噪声高于X波段。馈源罩采用了低密度柔性薄膜材料，噪声贡献估计值为3 K。双频馈源喇叭的损耗经计算小于0.05 dB，对应噪声贡献约为4 K。极化网络和低温前端

的噪声温度均为实测值，由于X波段采用了致冷极化器技术，其噪声贡献已经包含在X波段低温前端的实测数据中。低温前端30 dB以上的增益会有效抑制后级常温变频单元的噪声贡献，估计值约为1 K。由于S/X致冷接收机的总增益达到65 dB以上，与其连接的中频信号传输链路和VLBI数字终端等设备对于系统噪声的贡献可以忽略不计。另外，可以看出S波段常温极化网络对于系统噪声贡献明显，为下一步相关部件的致冷技术研究提供了依据。

表2 天顶方向系统噪声指标分配
Table 2 System noise budget at zenith

波段	K		
	S波段	X波段	说明
宇宙背景辐射	3	3	理论值
大气噪声	4	4	理论值
天线噪声	8	3	估计值
馈源罩	3	3	估计值
双频馈源	4	4	理论值
极化网络	21	—	实测值
低温前端	9	14	实测值
后级噪声贡献	1	1	估计值
系统噪声合计	53	32	实测值

针对我国探月工程VLBI测轨任务需求，自主研发了S/X双频致冷接收机，实现了探测器信标和标校天体射电源信号的双频段、同目标、同时间、高灵敏度接收，设备主要性能汇总见表3。通过采用双频馈源网络、双频双极化全通道、HEMT致冷低噪声放大器、致冷极化器和低温超导滤波器等多项致冷接收机关键技术，在S波段2.19~2.3 GHz频带内实现了接收机噪声温度8 K，天顶方向系统噪声温度53 K，在X波段8.2~9.0 GHz频带内实现了接收机噪声温度13 K，天顶方向系统噪声温度32 K，相对同频段常温接收机的系统灵敏度水平分别提升2倍和4倍，很好地完成了“嫦娥1号”~“嫦娥4号”的探月工程VLBI测轨任务，也促进了致冷接收机技术在我国测控系统深空站天线和地面应用系统地面接收站天线的推广和应用^[2]。

为适应未来月球与深空探测需求，未来致冷接收机技术发展将聚焦于两个方面：一方面是S波段极化器致冷，低温前端的真空窗口由现在的矩形波导口前移至极化器输入圆波导口，真空窗设计口径约为110 mm，S波段系统噪声有望降低到40 K以内；另一方面是向频谱资源更丰富的Ka频段拓展，致冷接收机相对于常温接收机的灵敏度优势会更加明显，从而进一步提升我国VLBI测轨精度。

表3 S/X致冷接收机性能汇总表

Table 3 Performance of S/X cryogenic receiver

	S频段	X频段
频段/GHz	2.19~2.30	8.2~9.0
极化方式	左右旋双圆极化	
致冷部件	超导滤波器，噪声注入耦合器，低噪声放大器	圆极化器，噪声注入耦合器，低噪声放大器
制冷系统	GM双级型制冷机和压缩机	
低温温度/K	14	12
杜瓦真空度/ 10^{-3} mbar	5	3
接收机增益/dB	70	65
低温前端噪声/K	8	13
系统噪声/K	53	32

4 结论

针对我国探月工程VLBI测轨分系统对于高灵敏度S/X双频接收的需求，本文提出了一种双频致冷接收机的设计方案与实现方法。文章首先以系统噪声最优化为目标，给出了接收机系统框架并论述其工作原理；其次对双频馈源网络、低温前端、HEMT致冷低噪声放大器、超导滤波器等主要部件从工作机理、设计方案、关键技术、实现工艺等方面进行了详细论述；最后通过整机系统噪声的实测与分析，验证了致冷接收机技术对于系统灵敏度提升的有效性。结果表明，S/X致冷接收机研制达到了预期的指标与功能，在我国探月工程“嫦娥1号”~“嫦娥4号”的多次任务中得到了成功应用，提升了我国高灵敏度接收设备的自主研发水平，为我国探月工程VLBI测轨任务的顺利实施做出了重要贡献。

参 考 文 献

- [1] 董光亮,李海涛,郝万宏,等.中国深空测控系统建设与技术发展[J].深空探测学报,2018,5(2):99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 99-114.
- [2] 蒋栋荣,洪晓瑜.甚长基线干涉测量技术在深空导航中的应用[J].科学,2008,60(1):10-14.
JIANG D R, HONG X Y. VLBI for deep-space navigation[J]. Science, 2008, 60(1): 10-14.
- [3] MAJID W, BAGRI D. Availability of calibration sources for measuring spacecraft angular position with sub-nanoradian accuracy[R]. California: JPL Pasadena, 2006.
- [4] BORDER J, LANYI G, SHIN D. Radiometric tracking for deep space navigation[C]//Proceedings of the AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, Colorado, USA: AAS, 2008.

- [5] TAYLOR J. Deep space communications[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley Telecom, 2016.
- [6] POSPIESZALSKI M W. Extremely low-noise amplification with cryogenic FET's and HFET's: 1970-2004[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2005, 6(3): 62-75.
- [7] BAUTISTA J J, BOWEN J G, FERNANDEZ N E, et al. Cryogenic, X-band and Ka-band InP HEMT based LNAs for the deep space network[C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings. Big Sky, Montana, USA: IEEE, 2001.
- [8] 王生旺, 李娇娇, 汪名峰, 等. 低温隔板极化器研制[J]. *低温技术*, 2014, 42(5): 8-11+21.
WANG S W, LI J J, WANG M F, et al. Design and performances of a cryogenic septum polarizer[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2014, 42(5): 8-11+21.
- [9] 何川, 王生旺, 李斌, 等. HEMT器件小信号等效电路低温模型的提取与分析[J]. *低温物理学报*, 2014, 36(2): 126-130.
HE C, WANG S W, LI B, et al. Extraction and analysis of small signal modeling of HEMT at cryogenic temperature[J]. *Low Temperature Physical Letters*, 2014, 36(2): 126-130.
- [10] 王生旺, 李贤华, 刘洋, 等. 超导滤波器在射电天文RFI中的应用[J]. *低温物理学报*, 2018, 40(5): 25-28.
WANG S W, LI X H, LIU Y, et al. Application of superconducting filter in radio astronomy RFI[J]. *Low Temperature Physical Letters*, 2018, 40(5): 25-28.
- [11] 秦顺友, 杜彪, 张文静. 反射面天线欧姆损耗噪声温度的计算[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2009, 4(4): 408-411.
QIN S Y, DU B, ZHANG W J. Calculation of noise temperature due to reflector antenna ohmic loss[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2009, 4(4): 408-411.
- [12] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望[J]. *中国科学:信息科学*, 2020, 50(1): 87-108.
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep space TT&C network[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2020, 50(1): 87-108.
- 作者简介:
李斌(1975-), 男, 正高级工程师, 主要研究方向: 射电天文厘米波段高灵敏度接收系统、低温低噪声微波器件技术。
通讯地址: 上海市南丹路80号上海天文台(200030)
电话: (021)34775571
E-mail: bing@shao.ac.cn

S/X Cryogenic Receiver Technology for VLBI Satellite Tracking

LI Bin¹, ZHONG Weiye¹, WANG Shengwang², ZHANG Lijun³, LIANG Shiguang¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, China;

2. The 16th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;

3. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: The high sensitivity cryogenic receiver is the important equipment to improve the measurement accuracy of the satellite tracking for Chinese Lunar Exploration Project. The low noise amplifiers of front end are cooled to 15 Kelvin. The equivalent noise temperature of cryogenic receiver is one order of magnitude lower than the traditional equipment working at room temperature, greatly improving the sensitivity of radio telescope. Several advanced technologies have been adopted to simultaneously realize highly sensitive dual-band observations on the same target, including S/X dual-band feed horn, cryogenic low noise amplifier based on HEMT, cryogenic polarizer and low temperature superconducting filter. The measured receive noise of S-band is 8 K in the frequency range 2.19~2.3 GHz, and the system noise is 53 K at zenith. The measured receiver noise of X-band is 13 K in the frequency range 8.2~9.0 GHz, and the system noise temperature is 32 K at zenith. The S/X cryogenic receivers have been applied successfully for VLBI satellite tracking in Chinese Lunar Exploration Project.

Keywords: cryogenic receiver; polarizer; noise temperature; low noise amplifier

Highlights:

- The S/X cryogenic receivers have been successfully applied to the VLBI satellite tracking in Chinese Lunar Exploration Project.
- Advanced technologies are adopted to the receiver design, including S/X dual frequency band feed horn, cryogenic low noise amplifier based on HEMT, cryogenic polarizer and low temperature superconducting filter.
- The receive noise of S-band is 8 K, and the system noise is 53 K at zenith.
- The receiver noise of X-band is 13 K, and the system noise temperature is 32 K at zenith.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]