引用格式:马浪明,刘佳,韦沛,等. 喀什 13 m VLBI 天线接收频段优化及结果分析[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 60-67.

喀什 13 m VLBI 天线接收频段优化及结果分析

马浪明^{1,2}, 刘佳^{1,2}, 韦沛¹, 李西顺^{1,2}, 南凯¹, 姚当¹, 杨旭海^{1,2†}

中国科学院 国家授时中心,西安 710600;
 中国科学院大学,北京 100087

摘要: 喀什 13 m 甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 观测站是 中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 观测系统的重要台站,特别是对世界时 UT1 测量有着不可 替代的作用。随着城市的快速扩张和 5G 移动通信普及,5G 移动通信信号等强干扰导致喀什观 测站天线系统灵敏度严重下降,严重影响了世界时 UT1 常规观测。针对此问题,提出利用超导 滤波器将接收频带从 C 频段调整为 X 频段,设计了优化调整方案并进行了改造实施。测试结果 表明,优化后基线灵敏度较优化前 C 频段提升 3.7 倍,UT1 测量精度提升了 12%。 关键词: 甚长基线干涉测量; 射频干扰; 世界时 D01: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-01-060-08

Receiving frequency band optimization and observation results of 13 m VLBI antenna in Kashi

MA Lang-ming^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, WEI pei¹, LI Xi-shun^{1,2}, NAN Kai¹, YAO Dang¹, YANG Xu-hai^{1,2†}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100087, China

Abstract: As an important site of the broadband VLBI (very long baseline interferometry) observation system developed by the National Time Service Center of the Chinese Academy of Sciences, the 13-meter antenna system in Kashi plays an irreplaceable role in the measurement of Universal Time (UT1).With rapid urban expansion and the widespread of 5G mobile communication, strong interference from signals such as 5G has severely degraded the sensitivity of the Kashi's antenna system, which seriously affects the routine UT1 observation. To solve this problem, a solution was proposed to adjust the receiving frequency band from C band to X band by using a superconducting filter. An optimized adjustment was designed and implemented. Experiment results show that the baseline sensitivity after optimization improved by 3.7 times compared to the previous C-band performance, and the measurement accuracy of UT1 is increased by 12%.

Key words: very long baseline interferometry (VLBI); radio frequency interference (RFI); Universal Time (UT1)

收稿日期: 2024-04-16; 接受日期: 2024-05-21; †: yyang@ntsc.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(12073034;12273047)

自 20 世纪 70 年代以来, 甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)技术因其 高测量精度,在天体测量、大地测量和深空导航等 领域发挥了重要作用^[1]。进入 21 世纪,国际上提 出了下一代基于 VLBI2010 技术规范^[2]的新测地 VLBI 规范。中国科学院国家授时中心为提高世界 时 UT1 自主测量和卫星测轨精度,参照 VLBI2010 技术规范,在国内率先构建了由喀什、吉林和三亚 3个台站和西安数据处理中心组成的宽带 VLBI 观 测系统。其中吉林—喀什基线为东西基线,三亚— 吉林基线为南北基线^[3-6]。宽带 VLBI 观测系统显著 提升了我国世界时 UT1 参数保障能力,在多次重 大航天任务中发挥了关键作用。UT1 参数的高精 度测定主要依赖于东西基线的观测数据, 喀什站 和吉林站构成的东西基线长达 4 000 km,因此喀 什站对基于宽带 VLBI 观测系统的 UT1 测定精度 起着至关重要的作用。

随着城市的快速扩张和 5G 移动通信普及,喀 什站附近 5G 干扰源日益增多,天线系统噪声温度 明显增大,致使观测干涉条纹质量下降,甚至不 能得到有效观测结果,对 UT1 常规观测造成极 大困境^[7]。

针对喀什站的干扰问题进行分析,本文提出 了喀什 VLBI 站的频段优化方案,并对天线系统进 行改造,将观测频段从 C 频段转换为 X 频段,避 开 5G 移动通信信号的影响。

1 宽频带 VLBI 观测系统

国家授时中心宽频带 VLBI 观测系统,由3个 13 m 口径天线的 VLBI 观测站和1个数据处理中 心组成。VLBI 观测数据处理中心位于陕西省西安 市,3个观测站分别位于吉林、喀什和三亚。吉林— 喀什基线长度为4018 km,吉林—三亚基线长度 3215 km,喀什—三亚基线长度3900 km^[8]。观测 站的经纬度及海拔高度见表1。3个 VLBI 观测站 配备可高速转动的13 m 口径环焦天线,考虑到L 频段(观测导航卫星系统的卫星)和C频段(观 测中国区域卫星导航系统的卫星)工作频带比标 准 VLBI2010 技术规范有所扩展,设计观测带宽为 1.2~9 GHz,为提高信噪比采用低温接收机,信号 记录带宽为4 GHz,发展了相应的下变频器(UDC) 和 VLBI 数据采集记录终端。喀什站13 m 天线外 观见图1。

表1 国家授时中心宽频带 VLBI 观测系统观测站位置

台址	经度/ (°)	纬度/(°)	海拔/m
吉林站	126	43	313
喀什站	76	39	1 242
三亚站	109	18	12



图 1 喀什观测站 13 m VLBI 天线

VLBI 观测河外射电源的微弱微波信号,因此 要求接收系统的灵敏度极高,能达到很高的信噪 比。为了降低接收系统的噪声水平,13mVLBI 天 线接收系统采用低温接收机¹⁹¹,接收机的原理如图 2 所示。

宽频带 VLBI 天线接收机系统噪声温度为

$$T_{\rm e} = T_{\rm e1} + \frac{T_{\rm e2}}{G_{\rm A1}} + \frac{T_{\rm e3}}{G_{\rm A1}G_{\rm A2}} + \dots \,\, (1)$$

式(1)中: *T*_e为整个接收系统的噪声温度; *T*_{ei}为 *i*级电路引起的噪声温度; *G*_{Ai}为*i*级电路的增益。 显然接收机系统的噪声主要由接收机第一级电路 的噪声所决定。

在13m天线低温接收机系统中第一级的微波器件为宽频线极化的四脊喇叭馈源,其主要呈现的是插损,则它的等效噪声温度*T*_{el}为¹¹⁰

)

$$T_{\rm el} = (1 - \frac{1}{L})T_0 \ .$$
 (2)

式(2)中, L为插损; T_0 为工作温度(绝对温度)。

由公式(2)可见,通过改变器件的环境温度 T_0 ,就可以改变器件引入的噪声。在 13 m 宽频带 接收系统中,由于馈源工作频段特别宽,相应的插 损也较大,为了尽可能降低馈源引入的噪声,将馈 源的温度降至 20 K,从而显著降低了接收机的整 体噪声。



图 2 喀什观测站宽带低温接收机原理图

喀什建站初期,为了更好地满足 C 频段卫星 观测试验任务需求,利用超导滤波器将馈源的 1.2~9 GHz 宽带射频信号进行滤波处理,工作频 段为 C 频段,通过第一级前级低温低噪声放大器 (LNA)对信号进行放大,LNA 工作频段为 1.2~5 GHz,两路线极化信号通过电桥转换为左旋 圆极化(LCP)和右旋圆极化(RCP),并通过后 级链路输出给宽带下变频器 UDC。

2 射频干扰分析及频段优化

通过对喀什站天线接收频谱进行分析,发现 喀什站接收信号在 3.4~3.5 GHz 存在强干扰,如图 3 所示。



图 3 喀什站 5G 强干扰情况下天线朝天状态的接收频谱

考虑到随着城市的扩张和 5G 移动通信的商 用普及,喀什站所在位置已属于喀什新城区,附近 建立了多个 5G 基站,基站发射功率达到百瓦级水 平¹¹¹。结合 5G 信号频段划分,可以推断该强干扰 信号属于 5G 移动通信信号¹¹²¹。3.4~3.5 GHz 的 5G 移动通信频率在喀什站 13 m 天线 3~5 GHz 的接收 频带内,造成了严重的交调和低噪声放大器过载 饱和问题,严重影响了天线系统的灵敏度,导致 UT1 的常规观测无法正常开展。

鉴于 C 频段 5G 通信射频干扰问题,为了保 障 UT1 观测,提出将接收频段从 C 频段优化调整 为 X 频段的策略。这一优化决策基于以下理论分 析和预期优势。

① 5G 的工作频段为 3.4~3.5 GHz, 不影响 X 频段。

② 频率提升可以改善天线增益。理论上,从 C 频段升级到 X 频段,频率提高了 2 倍。根据天 线增益与频率的关系,天线增益将相应提高^[13]。在 理想情况下,这种频率的提升将导致天线增益提 高 4 倍,从而显著增强天线接收到的信号强度。

③ 频率提升可以减少电离层误差。在高频段 电离层对信号的影响相对较小^[14]。由于 X 频段的 频率比 C 频段提高了 2 倍,可以预期信号的电离 层延迟误差将缩小 4 倍。

为快速高效地实现频段优化功能,解决信 号强干扰问题,选取现有 X 频段带通超导滤波 器对原滤波器进行更换。该滤波器带通为8~9GHz, 性能参数如表 2 所示。

2023 年 3 月初,实施喀什站天线频段优化调整改造。将带通为 2~5 GHz 的原超导滤波器(如图 2 中黑色实线所示)更换为带通为 8~9 GHz 的 X 频段超导滤波器(如图 2 中蓝色虚线所示)。 在实施 X 频段滤波器之前,我们确保了其与现有系统的兼容性,并在实验室进行了严格的测试,以验证其性能。同时,将原工作在 1.2~5 GHz 的 LNA。更换为与吉林站一样的工作在 1.2~9 GHz 的 LNA。

器件	工作频率 /GHz	带外抑制 /dB	插入损耗 /dB	驻波比	工作温度/K		
带通超导 滤波器	8.0~9.0	≥60 @(1-7.5 GHz)	≤0.18	≤1.3	15		

表 2 X 频段超导滤波器的性能参数

3 测试结果及分析

为验证频段优化后的系统性能,对天线系统的 X 频段典型接收频谱进行了测试,初步检验系统在 X 频段的灵敏度;利用吉林和喀什站天线在 X 频段开展了 VLBI 条纹检测,验证了喀什站 X 频段具备常规 VLBI 观测的条件;开展常规的 UT1 观测,并对 C 频段和 X 频段的 UT1 结果进行分析比较。

3.1 单天线测试

为测试优化后的系统功能,对系统接收频谱 进行了测量,天线朝天状态时,测量结果如图4所 示。结果表明,在8~9 GHz范围内,未发现明显 的干扰信号。

3.2 VLBI 条纹试验

为了分析喀什站频段优化后的干涉测量性能,

利用吉林一喀什基线开展 VLBI 条纹试验,并与原 C 频段的条纹试验结果进行比较(表3),分析 X 频段的观测性能。试验观测强射电源 1928+738,优 化前系统 C 波段在加长积分时间的情况下,可勉 强获得条纹,如图 5 中所示,各项指标较差,说 明系统已无法开展正常的观测任务。



图 4 频段优化后喀什站天线朝天状态的接收频谱

试验时间	观测目标	观测站点	观测频段/MHz	观测带宽/MHz	量化比特/bit
20230110T0330	1928+738	喀什站 吉林站	3 218~3 720	512	2
20230313T0300	1928+738	喀什站 吉林站	8 160~8 672	512	2

表 3 喀什—吉林基线观测 1928+738 射电源条纹试验信息

试验结果如图 5 和表 4 所示。由图 5 (a) 可见 X 频段的互相关谱幅值明显高于 C 频段幅值,

约为 C 频段的两倍; X 频段在更短的积分时间得 到了更高的信噪比和更高的时延测量精度。



(a) 吉林—喀什 X band 60 s 积分 (SNR: 21.8)



(b) 吉林—喀什 C band 170 s 积分(SNR: 12.9)

注: 红色点为相位谱, 蓝色点为幅度谱

图 5 吉林一喀什基线观测 1928+738 射电源的幅度相位谱图[15]

表4 吉林一喀什基线观测 1928+738 射电源结果

观测时间	观测频率/MHz -	观测方位角/(°)		观测俯仰	观测俯仰角/(°)		启品业	叶环转中生。
		吉林	喀什	吉林	喀什	你们时间你	百采比	旳延相度/ps
20230110T0330	3 218~3 720	2	20	60	48	170	12.9	84
20230313T0300	8 160~8 672	340	60	53	55	60	21.8	50

VLBI 观测条纹信噪比 SNR 可由式(3)~(4) 计算^[16]:

$$R = S_c q \sqrt{\frac{1}{S_1 S_2}} \sqrt{2BT} , \qquad (3)$$

$$S = \frac{8kT_{\rm s}}{\eta\pi D^2} \,\,. \tag{4}$$

式(3)~(4)中: R 为信噪比, S 为系统等效流 量密度(system equivalent flux density),下标1和 2分别表示测站1和2, S_c 为射电源的流量,q为 数据采样量化和相关处理的信噪比下降因子,k为 玻尔兹曼常数, D 为测站的天线口径, η 为天线口 面效率, T_s 为系统噪声温度, B 为信号记录带宽, T 为积分时间, 2BT 表示在 T 时间段内的采样数。

由于观测带宽一致,根据上式推导出公 式(5):

$$\frac{S_{\text{sch}x\,\text{sp}}S_{\text{tak}x\,\text{sp}}}{S_{\text{sch}c\,\text{sp}}S_{\text{tak}x\,\text{sp}}} = \frac{R_{C\,\text{sp}}^{2}}{R_{X\,\text{sp}}^{2}} \cdot \frac{(S_{C})_{X\,\text{sp}}^{2}}{(S_{C})_{C\,\text{sp}}^{2}} \cdot \frac{T_{X\,\text{sp}}}{T_{C\,\text{sp}}} \circ (5)$$

射电源 1928+738 在 C 频段的流量为 1.832 Jy, X 频段的流量为 1.362 Jy¹¹⁷;可计算得喀什频段优化

后 X 频段的吉林喀什基线灵敏度相较于 C 频段的基线灵敏度提升 3.7 倍。

同一射电源 C 频段和 X 频段的流量不同,但 差异不大,本系统开展 UT1 观测时所使用的射电 源 C、X 频段流量比较如图 6 所示。从图 6 中可 以看出,不同射电源的 C、X 频段流量各有强弱, 但整体差异不大。在 C 频段面临强干扰无法正常 观测的情况下,UT1 采用 X 频段观测是可行的, 不同频段射电源流量的差异不会明显影响 UT1 测 量性能。



图 6 国家授时中心 UT1 观测使用的射电源 C 频段、X 频段流量比较

3.3 优化前后 UT1 观测情况比较

吉林—喀什基线在 C 频段开展的 UT1 观测结 果如图 7 所示。图 7 (a) 红色星号代表吉林—喀 什基线观测解算得到的 UT1 序列, 黑线代表 IERS C04 UT1¹¹⁸序列,图7(b)为二者的差值。从图7 中看到吉林—喀什基线观测 UT1 序列与 IERS C04 序列的差值集中在±200 μs 以内,解算 UT1 相对 IERS 结果的偏差的 RMS 为 97.0 μs。





图 7 国家授时中心吉林一喀什基线 C 频段观测解算的 UT1 序列与 IERS C04 UT1 序列比较

喀什站接收机频段优化后,吉林一喀什基线 在 X 频段开展了 UT1 观测试验,观测持续 3 h,

 喀什基线观测解算得到的 UT1 序列,黑线代表 IERS C04 UT1 序列,图 8(b)为二者的差值。图 8 中看到吉林—喀什基线观测 UT1 序列与 IERS C04 序列的差值集中在±180 μs 以内,解算 UT1 相对 IERS 结果的偏差的 RMS 为 85.3 μs,相对于 C 频段提升了约 12%。由此也可以验证:喀什站 接收系统优化是有效的,保证了 UT1 的常规观测, 且观测性能有所提升。



UT1 序列与 IERS C04 UT1 序列比较

4 结论

基于喀什站的射频干扰情况,提出利用 X 频

段超导滤波器对喀什站接收频段进行优化调整, 有效改善了强干扰对于喀什站 VLBI 观测的影响。 测试结果表明,与原 C 频段测量相比,喀什-吉林 基线 X 波段的灵敏度提升 3.7 倍,世界时 UT1 测 量精度提升了 12%。后续将专门设计 X 频段超导 滤波器和低噪声放大器等,优化天线系统 X 频段 的增益、噪声温度、指向精度等参数,有望进一步 改善喀什站 13 m 天线系统的灵敏度和信噪比,从 而进一步提高 VLBI 时延观测精度和世界时 UT1 测量精度。

参考文献:

- SCHUN H, BEHREND D. VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry[J]. Journal of Geodynamics, 2012, 61: 68-80.
- [2] PETRACHENKO W T, NIELL A E, COREY B E, et al. VLBI2010: next generation VLBI system for geodesy and astrometry[C] // Geodesy for Planet Earth: Proceedings of the 2009 IAG Symposium, Buenos Aires: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 999-1005.
- [3] GONG J J, CAO F, YANG X H, et al. The GEO satellite orbit experiment measured by combination of the broadband VLBI & the orbit tracking of two way range[K]. Boletin Tecnico/Technical Bulletin, 2017, 55(8): 39-47.
- [4] YAO D, WU Y W, ZHANG B, et al. The NTSC VLBI system and its application in UT1 measurement[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20(6): 153-162.
- [5] 弓剑军,马浪明,姚当,等. 基于 VGOS 观测同步卫 星试验分析[J]. 时间频率学报,2018,41(4):354-361.
- [6] 姚当,弓剑军,马浪明,等.基于 VGOS 系统的 UT1 初步观测与计算[J].时间频率学报,2018,41(3): 234-241.
- [7] WATERMAN P J. Conducting radio astronomy in the EMC environment[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 1984(1): 29-33.
- [8] 吴元伟,李西顺,孙保琪,等.国家授时中心自主世界时测量与服务系统[J].时间频率学报,2022,45(3): 184-193.

- [9] MARTELLOSIO A, PASIAN M, RAYET R, et al. Wideband cryogenic receiver for very long baseline interferometry applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 17(2): 275-278.
- [10] 钱志瀚,李金岭.甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用[M].北京:中国科学技术出版社,2012.
- [11] 李刚,李盛富,王磊,等.通信基站电磁辐射安全防 护距离的理论计算及应用[J].环境污染与防治,2023, 45(4):549-553.
- [12] 工业和信息化部关于第五代移动通信系统使用 3 300~
 3 600 MHz 和 4 800~5 000 MHz 频段相关事宜的通知[EB/OL]. (2017-11-09)[2024-01-31]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/txy/art/2020/art_3ff1b98f66b3404
 ea55e34c4621e00de.html.
- [13] 魏文元, 宫德明, 陈必森. 天线原理[M]. 北京: 国防 工业出版社, 1985.

- [14] SPOELSTRA T A T. Correcting VLBI observations for ionospheric refraction[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1995, 57(2): 163-167.
- [15] CAPPALLO R. Fourfit user's manual[C] // Massachusetts: MIT Haystack Observatory, 2017.
- [16] THOMPSON A R, MORAN J M, SWENSON G W. Interferometry and synthesis in radio astronomy[M]. [S.L.]: Springer Nature, 2017.
- [17] PETROV L. VLBI global solution rfc_2023d[EB/OL].
 (2024-01-03)[2024-01-31]. http://astrogeo.org/sol/rfc/rfc_ 2023d/.
- [18] BIZOUARD C, LAMBERT, GATTANO C, et al. The IERS EOP 14C04 solution for Earth orientation parameters consistent with ITRF 2014[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93: 621-633.