中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 12 期: 129512
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

基于高通量相关处理技术的X/Ka双频天体测量

何旋[1,2], 舒逢春[1,3*], 童锋贤[1,3], 江悟[1], 甘江英[1], 黄逸丹[1,3], 柳聪[1], 刘宇伟[1], 孙正雄[1], 万程凯[1], 李金岭[1], 齐朝祥[1,2]

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030
2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049
3. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030
*联系人, E-mail: sfc@shao.ac.cn

收稿日期: 2026-02-02; 接受日期: 2026-03-24; 网络出版日期: 2026-11-10
中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA0350203)和国家自然科学基金(编号: 12303098)资助

摘要 面向X/Ka双频高精度天体测量与Ka频段深空导航的需求, 在国内首次利用13 m射电望远镜观测网开展了10次VLBI绝对天体测量, 自主搭建了国内首套专用数据处理平台, 实现了干涉测量数据吞吐率高达23 Gbps的高通量相关处理, 建立了国内首套标准化X/Ka双频数据处理流程. 数据处理结果表明, 在108颗目标射电源中成功探测到107颗, 其中18颗未被ICRF3-XKa射电源表收录, 占已探测射电源总数的16.8%, 为扩展X/Ka频段天球参考架提供了独有样本. 10次观测实验的加权拟后残余时延中位数约为20 ps, 优于传统S/X双频观测约25 ps的典型值, 并显著优于美国深空网X/Ka双频观测的43.6 ps, 射电源赤经和赤纬位置单次解算精度中位数分别为0.64和0.82 mas, 表明当前观测条件下我国X/Ka双频天体测量已达到较高精度水平. 此外, 量化分析了国内观测网Ka频段的探测灵敏度, 通过增加积分时间和观测带宽等观测策略, 可使当前国内观测网的射电源流量密度探测极限从约0.2 Jy进一步提升至0.1 Jy. 观测结果成功验证了我国在X/Ka双频天体测量领域具备自主的观测与高精度数据处理能力, 将用于X/Ka频段天球参考架的构建与精化.

关键词 X/Ka双频观测, VLBI, 天球参考架, 相关处理, 天体测量

PACS: 95.10.Jk, 95.55.Br, 95.75.Kk, 95.55.Jz, 95.75.-z

1 引言

传统的射电天球参考架是基于甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术在S/X频段构建的[1,2]. 相较于X频段, 射电源在Ka频段的结构更致密、核移效应更小[3,4], 从而有助于提升射电天球参考架的精度及其与Gaia光学参考架的连接精度[5,6]. 在深空探测应用方面, Ka频段能提高深空通信的数据传输速率和深空探测器的VLBI测角能力, 此外, Ka频段能有效抑制太阳等离子体对时延观测量的影响, 从而能观测离太阳更近的航天器[7,8]. 通过X/Ka双频观测, 可有效消除电离层效应, 构建高精度的X/

引用格式: 何旋, 舒逢春, 童锋贤, 等. 基于高通量相关处理技术的X/Ka双频天体测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 129512
He X, Shu F C, Tong F X, et al. X/Ka dual-band astrometry based on high-throughput correlation processing technique (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 129512, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0066

© 2026《中国科学》杂志社

Ka频段射电天球参考架. 虽然Ka频段存在射电源更为暗弱、对天线面型精度要求更高等挑战, 但是通过提高观测带宽可部分弥补这些不足[9,10].

2020年发布的第三代国际天球参考架(ICRF3), 首次纳入射电源在K和X/Ka频段的精确位置[1], 标志着多频段射电天球参考架的突破. 美国主导着X/Ka频段天球参考架的构建和维持. 美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)所属的深空网(Deep Space Network, DSN), 由位于美国Goldstone、澳大利亚Tidbinbilla和西班牙Robledo的3个深空站组成, 每个站址配置一台70 m口径射电望远镜, 并自21世纪初起陆续新建多台34 m口径波束波导(Beam-waveguide, BWG)射电望远镜. 该型天线具备更高的指向精度与工作频率扩展能力, 可覆盖至50 GHz以上频段; 通过天线组阵方式, 其等效灵敏度可与70 m级天线相当. 各深空站的X频段接收机覆盖400 MHz带宽, Ka频段接收机覆盖500 MHz带宽. 自2005年7月起, DSN开始开展X/Ka双频天体测量. 早期的观测数据速率为112 Mbps, 2011年提高到448 Mbps, 自2014年起观测数据速率进一步提高至2048 Mbps[11], 从而显著提高了观测灵敏度[12]. 目前ICRF3在X/Ka频段的射电源表(ICRF3-XKa)包含678颗全天球分布的射电源, 射电源位置精度的中位数为0.12 mas. 该成果主要基于168次单基线X/Ka频段观测数据, 参加观测的主要为DSN的7台34 m口径射电望远镜, 少量观测有欧洲空间局(European Space Agency, ESA)在阿根廷的Malargüe站参加[1]. 近年来, 日本航天局(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的Misasa站亦参与了部分由美国组织的X/Ka频段天体测量观测.

近年来, 我国依托国内VLBI站网在S/X频段射电天体测量方面已取得了实质进展. 一方面组织开展了VLBI黄道面巡天, 系统扩充了可用于射电天球参考架加密的黄道带S/X频段射电源样本[13], 另一方面开展了南天区射电源高灵敏度天体测量并获取高精度位置成果[14]. 目前国内多个VGOS站的13 m射电望远镜具备X/Ka双频观测能力, 其中上海佘山和乌鲁木齐南山的VGOS站已常态化参加国内外VLBI联测[15]. 2025年5月, 泰国清迈13 m VGOS射电望远镜落成, 该望远镜配置了X/Ka双频接收机, 未来可与国内的13 m射电望远镜开展联合观测, 改善国内观测网的几何构型[16,17]. 本文依托国内13 m射电望远镜观测站网, 开展了X/Ka双频段天体测量观测实验, 重点介绍了实验设计、高通量相关处理平台和数据处理流程, 给出了观测结果, 该结果对于高精度X/Ka频段天球参考架的自主构建和我国未来Ka频段深空测控导航任务具有重要意义.

2　实验设计

在X/Ka双频天体测量观测实验中, 观测纲要文件采用SKED软件生成. 观测实验采用4个频带记录观测数据, 第一个频带是X频段, 观测频率范围为8192.0–8672.0 MHz; 后面三个频带是Ka频段, 观测频率范围为30000.0–32528.0 MHz. 每个频带输出2个圆极化分量(右旋/左旋), 每个频带每个极化输出8个通道, 共输出64个通道. 每个通道的带宽为32 MHz, 采用2 bit采样, 单通道数据速率为128 Mbps, 数据总速率为8192 Mbps, 比深空网高了4倍. Ka频段采用了3个频带, 观测带宽和数据速率是X频段的3倍, 目的是提高Ka频段的探测灵敏度. 考虑到射电源在Ka频段的流量密度未知, 首批观测的目标射电源为X频段的强射电源. 表1列出了108颗目标射电源的IERS名称、J2000历元下的赤经与赤纬(第2、3列)、是否为ICRF3-SX定义源(第4列)以及各射电源的计划观测次数与计划总观测量个数(第5、6列). 其中, 共有61颗目标射电源为ICRF3-SX定义源, 全部目标射电源的计划观测次数中位数为7次, 总计划观测量个数的中位数为195次.

基于VGOS天线快速转动的特点, 观测片段(scan)时长设定为60–120 s, 以兼顾信噪比与scan个数的需求. 在每1 h的时间窗口内, 观测的目标射电源在观测台站的本地天空尽量均匀分布, 以尽可能消除大气效应. 在X/Ka双频观测中, 通过X频段与Ka频段观测时延的组合消除电离层效应.

在2024–2025年期间, 利用国内6台具备X/Ka双频观测能力的13 m VGOS射电望远镜, 开展了10次X/Ka双频天体测量观测实验, 每次观测实验持续24 h, 累积了1.6 PB的原始观测数据. 该观测网络覆盖中国内陆与沿海区域, 形成纵贯南北、横跨东西的布局, 上海佘山13 m作为主力观测设备, 参加了所有观测实验, 其他站仅参加部分观测. 该观测站网共构成15条基线, 长度介于1100–3500 km之间, 其中东西向基线投影最大值达3100 km, 南北向基线投影最大值达2900 km. 但是, 最南端的测站仅参与一次观测, 观测代码为

表 1　X/Ka双频天体测量观测目标射电源表

Table 1　Catalog of target radio sources for X/Ka dual-band astrometric observations

射电源名称	J2000赤经 (h m s)	J2000赤纬 (° m s)	定义源	计划参与实验次数	计划总观测量个数
0003−066	00 06 13.89288482	−06 23 35.3353584	–	1	18
0016+731	00 19 45.78637230	73 27 30.0176020	D	7	828
0019+058	00 22 32.44121084	06 08 04.2689202	–	7	317
0035−252	00 38 14.73550152	−24 59 02.2352926	D	10	315
0059+581	01 02 45.76237340	58 24 11.1366164	D	10	759
0104−408	01 06 45.10796439	−40 34 19.9603733	D	1	6
0109+224	01 12 05.82471597	22 44 38.7863503	–	5	120
0119+041	01 21 56.86169274	04 22 24.7342932	–	4	138
0119+115	01 21 41.59504128	11 49 50.4132344	–	3	61
0133+476	01 36 58.59480326	47 51 29.1000720	D	9	600
0202+319	02 05 04.92536206	32 12 30.0954703	D	10	666
0215+015	02 17 48.95475095	01 44 49.6990271	D	1	6
0229+131	02 31 45.89405619	13 22 54.7162847	–	5	176
0235+164	02 38 38.93010450	16 36 59.2745528	D	2	96
0332−403	03 34 13.65448823	−40 08 25.3979928	D	1	12
0336−019	03 39 30.93778633	−01 46 35.8041892	–	8	171
0345+460	03 49 18.74157513	46 09 59.6578198	–	1	18
0346−279	03 48 38.14457039	−27 49 13.5657855	D	9	241
0420−014	04 23 15.80072217	−01 20 33.0656073	–	7	300
0434−188	04 37 01.48273617	−18 44 48.6135530	–	9	253
0446+112	04 49 07.67110194	11 21 28.5963618	–	10	476
0454−234	04 57 03.17922481	−23 24 52.0203248	D	1	9
0458−020	05 01 12.80988538	−01 59 14.2564557	D	10	340
0552+398	05 55 30.80561419	39 48 49.1649683	D	10	673
0602+673	06 07 52.67161421	67 20 55.4100806	–	9	803
0606−223	06 08 59.68684160	−22 20 20.9567640	–	6	136
0613+570	06 17 16.92256638	57 01 16.4232088	D	7	309
0632−235	06 34 59.00100130	−23 35 11.9573454	–	4	153
0642+449	06 46 32.02599653	44 51 16.5901185	–	8	462
0646−306	06 48 14.09646706	−30 44 19.6597807	D	3	57
0648−165	06 50 24.58185949	−16 37 39.7255562	D	2	32
0700−197	07 02 42.90066398	−19 51 22.0355917	D	4	120
0716+714	07 21 53.44847569	71 20 36.3634294	D	2	123
0718+792	07 26 11.73523889	79 11 31.0162113	–	6	651
0727−115	07 30 19.11247452	−11 41 12.6006642	D	8	315
0736+017	07 39 18.03389906	01 37 04.6177501	D	7	321
0748+126	07 50 52.04573865	12 31 04.8282079	D	9	453
0800+618	08 05 18.17956222	61 44 23.7005580	D	2	12
0805+410	08 08 56.65204477	40 52 44.8888932	D	2	48
0812+367	08 15 25.94486402	36 35 15.1487857	–	7	272
0814+425	08 18 15.99961476	42 22 45.4148987	–	1	12
0823+033	08 25 50.33835759	03 09 24.5199749	–	9	314
0827+243	08 30 52.08619250	24 10 59.8202919	–	1	24
0851+202	08 54 48.87492968	20 06 30.6408240	–	9	529

(续表1)

射电源名称	J2000赤经 (h m s)	J2000赤纬 (° m s)	定义源	计划参与实验次数	计划总观测量个数
0854−108	08 56 41.80415844	−11 05 14.4303584	–	6	95
0917+449	09 20 58.45848666	44 41 53.9850947	–	7	143
0920−397	09 22 46.41826886	−39 59 35.0682386	–	1	3
0955+476	09 58 19.67164698	47 25 07.8424065	D	3	99
1034−293	10 37 16.07974265	−29 34 02.8134977	–	10	215
1039+811	10 44 23.06257022	80 54 39.4430485	–	2	180
1040+244	10 43 09.03578135	24 08 35.4094642	D	9	494
1124−186	11 27 04.39245388	−18 57 17.4418445	D	10	331
1144+402	11 46 58.29791724	39 58 34.3043988	D	9	573
1144−379	11 47 01.37071212	−38 12 11.0235229	D	1	12
1149−084	11 52 17.20951637	−08 41 03.3139769	D	8	345
1156+295	11 59 31.83391383	29 14 43.8268224	–	9	461
1213−172	12 15 46.75176509	−17 31 45.4031219	–	8	198
1228+126	12 30 49.42338414	12 23 28.0436859	–	10	481
1243−072	12 46 04.23211565	−07 30 46.5746985	D	6	98
1244−255	12 46 46.80203943	−25 47 49.2889822	D	3	55
1255−316	12 57 59.06083282	−31 55 16.8516590	–	5	87
1308+328	13 10 59.40273257	32 33 34.4495500	D	10	348
1334−127	13 37 39.78278132	−12 57 24.6933925	D	7	323
1351−018	13 54 06.89532721	−02 06 03.1904962	D	4	72
1406−076	14 08 56.48120623	−07 52 26.6665312	D	5	195
1424−418	14 27 56.29756617	−42 06 19.4376238	D	1	9
1502+036	15 05 06.47716039	03 26 30.8125704	–	8	322
1502+106	15 04 24.97978391	10 29 39.1985309	D	2	90
1504+377	15 06 09.52997529	37 30 51.1325012	D	7	103
1514+197	15 16 56.79616460	19 32 12.9919519	D	2	18
1519−273	15 22 37.67599511	−27 30 10.7855131	D	9	204
1546+027	15 49 29.43684740	02 37 01.1632556	–	4	96
1606+106	16 08 46.20318700	10 29 07.7757424	D	9	459
1622−253	16 25 46.89164287	−25 27 38.3268734	–	3	18
1638+398	16 40 29.63277140	39 46 46.0284071	–	1	24
1639−062	16 42 02.17771463	−06 21 23.6950367	D	8	99
1652+398	16 53 52.21668403	39 45 36.6088754	–	7	313
1657−261	17 00 53.15406418	−26 10 51.7253944	D	7	212
1705+018	17 07 34.41527083	01 48 45.6993042	D	7	195
1732+389	17 34 20.57853650	38 57 51.4430945	–	3	105
1741−038	17 43 58.85613537	−03 50 04.6167326	D	10	361
1749+096	17 51 32.81857326	09 39 00.7284066	D	10	377
1751+288	17 53 42.47364223	28 48 04.9388788	D	10	448
1800+440	18 01 32.31481983	44 04 21.9002442	–	1	9
1803+784	18 00 45.68390840	78 28 04.0183947	–	9	1350
1807+698	18 06 50.68064963	69 49 28.1084920	–	3	195
1823+568	18 24 07.06837171	56 51 01.4908155	–	9	435
1846+322	18 48 22.08857099	32 19 02.6037977	D	7	129
1908−201	19 11 09.65289294	−20 06 55.1090664	D	6	198

(续表1)

射电源名称	J2000赤经 (h m s)	J2000赤纬 (° m s)	定义源	计划参与实验次数	计划总观测量个数
1921−293	19 24 51.05595254	−29 14 30.1210248	D	9	199
1923+210	19 25 59.60535459	21 06 26.1620257	–	10	442
1936−155	19 39 26.65775171	−15 25 43.0584711	D	5	120
1954−388	19 57 59.81927491	−38 45 06.3558881	D	1	12
1958−179	20 00 57.09043927	−17 48 57.6726139	–	4	162
2000+472	20 02 10.41824494	47 25 28.7737471	D	1	84
2008−159	20 11 15.71092555	−15 46 40.2537406	D	3	74
2037+511	20 38 37.03472279	51 19 12.6624988	–	9	623
2059+034	21 01 38.83415344	03 41 31.3207714	D	10	356
2113+293	21 15 29.41345155	29 33 38.3669390	D	10	458
2126−158	21 29 12.17589329	−15 38 41.0419083	–	10	232
2209+236	22 12 05.96631459	23 55 40.5438259	D	9	528
2214+241	22 17 00.82117644	24 21 45.9580153	–	1	33
2223−052	22 25 47.25929101	−04 57 01.3907626	–	8	373
2227−088	22 29 40.08433313	−08 32 54.4355294	D	2	48
2229+695	22 30 36.46973826	69 46 28.0769147	D	8	791
2255−282	22 58 05.96287687	−27 58 21.2567572	–	10	236
2318+049	23 20 44.85659166	05 13 49.9526016	D	8	193
2355−106	23 58 10.88239662	−10 20 08.6114174	D	7	79

ST2413，在其余观测中南北向基线投影最大值为1800 km. 这一台站布局与基线配置为国内高精度VLBI天体测量提供了优良的空间分辨率和几何覆盖. 表2汇总了观测实验的概况，包括观测代码、观测时间、参与台站数、scan个数和射电源颗数等统计信息，每次实验的参与台站数不少于3站，射电源数量在52–74颗范围. 通过10次系统性观测，累计观测了108颗目标射电源.

3　高通量相关处理平台

目前国际上VLBI相关处理主要采用高性能集群计算平台和专用的相关处理软件系统[18]，这在欧洲VLBI网(European VLBI Network, EVN)[19]、德国波恩IVS相关处理中心[20]、美国国立天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)、麻省理工学院Haystack天文台[21]和澳大利亚LBA网等得到广泛应

表 2　X/Ka双频天体测量观测实验概况
Table 2　Overview of X/Ka dual-band astrometric experiments

序号	观测代码	观测日期	开始时间 (UT)	参与台站数	Scan个数	观测射电源颗数	原始观测数据量 (TB)
1	ST2406	2024-9-12	10:00	3	288	66	106
2	ST2411	2024-11-3	10:00	4	320	52	157
3	ST2413	2024-11-6	7:00	5	320	59	197
4	ST2414	2024-12-10	2:00	4	531	66	144
5	ST2415	2024-12-11	8:00	3	407	74	114
6	C006KA	2025-3-17	17:00	3	480	64	162
7	C007KA	2025-3-19	1:00	3	480	64	157
8	C008KA	2025-4-18	3:00	4	783	67	198
9	C009KA	2025-4-19	7:00	4	785	68	199
10	C010KA	2025-4-23	11:00	4	781	68	195

用. 针对国内5台站X/Ka双频天体测量实验, 单站观测数据速率高达8192 Mbps, 考虑到天线只有一半左右时间在记录数据, 单站平均数据速率约4 Gbps, 要求实现20 Gbps数据吞吐率的高通量相关处理.

高通量相关处理平台硬件设备包括管理节点、后处理节点、计算节点、存储节点、数据回放单元和交换机等, 设备之间用100 G的低延迟高速Infiniband通信设备进行互联, 并通过以太网通信设备进行管理, 见图1. 平台的详细性能参数如表3所示, 其中每个计算节点有48个CPU核, 共有864个CPU核可用于高通量并行相关处理计算; 所有存储节点利用分布式存储, 在RAID 6模式下, 阵列的最终可用容量约为3.6 PB.



图 1　(网络版彩图)相关处理平台硬件系统
Figure 1　(Color online) Hardware system of the correlator platform.

表 3　相关处理平台硬件性能参数
Table 3　Hardware performance parameters of the correlator platform

设备	性能参数
管理节点	2颗Intel处理器(2.1 GHz, 12核), 128 GB内存
后处理节点	2颗Intel处理器(3.6 GHz, 16核), 128 GB内存
计算节点	18个计算节点, 每个节点配备2颗Intel处理器(2.8 GHz, 24核)和256 GB内存, 总计864个CPU核
存储节点	RAID6架构, 裸存储容量达3.6 PB
数据回放单元	3台Mark6设备
IB交换机	100 G InfiniBand用于内部计算网络互联
千兆交换机	用于内外网络连接

相关处理平台上部署了原始数据回放、数据处理和数据分析需要的所有软件, 主要分为开源和自研两类软件. 开源软件包括DiFX相关处理软件、 HOPS相关后处理软件和nuSolve数据分析软件等; 自研软件包括相关处理控制文件修正软件、钟差计算软件、MARK6数据回放软件和相关处理报告自动生成软件等, 如下图2所示, 这些软件的功能将在第4节详细介绍. 此外, 该平台还安装了数据管理和运行监控软件以更好地监管和配置平台资源.

为了评估该平台的计算性能, 利用VO4045观测数据开展了相关处理总数据吞吐率测试. VO4045是IVS的一次VGOS国际联测数据, 2024年2月14日持续观测24 h, 一共13个站参与, 其中1 h的原始观测数据量为13 TB, 用于相关处理总数据吞吐率测试. 测试了不同的CPU核数的相关处理总数据吞吐率, 如图3所示当使用的CPU核数达到264个时, 相关处理总数据吞吐率高达23 Gbps, 已能满足5台站、每台站4 Gbps的高通量相关处理需求. 该平台采用高性能集群计算架构, 系统共有864个CPU核, 因此具备三路并行处理能力.

4　数据处理流程

台站的原始观测数据记录在Mark6磁盘模组上, 通过快递将磁盘寄送到上海, 利用处理平台的数据回放单元进行数据聚合和解析后, 才能获得可以用于相关处理的VDIF格式数据. 主要的数据处理流程如图2所示, 具体包括以下步骤.

(1) 数据回放和控制文件准备: 数据处理的第一阶段为数据回放与控制文件准备, 主要任务包含将台站记录的Mark6格式原始观测数据回放至相关处理系统, 以及生成条纹搜索所需的相关处理输入文件(控制文件). 该控制文件生成阶段借助自研的钟差计算软件, 从各台站观测日志中提取格式器记录的钟差, 通过拟合获得各站的钟差与钟速参数[22]. 在此基础上, 进一步补偿每个台站的设备时延——即信号从天线参考点经接收机、电缆、采集终端直至格式器所经历的系统固定延迟. 该延迟通常难以直接测量, 本研究所使用的佘山与南山13 m设备时延值, 是通过参与IVS组织的国际VGOS联测并进行相对标校后获得的. 经过格式器钟差与设备时延的联合补偿, 可显著提升后续

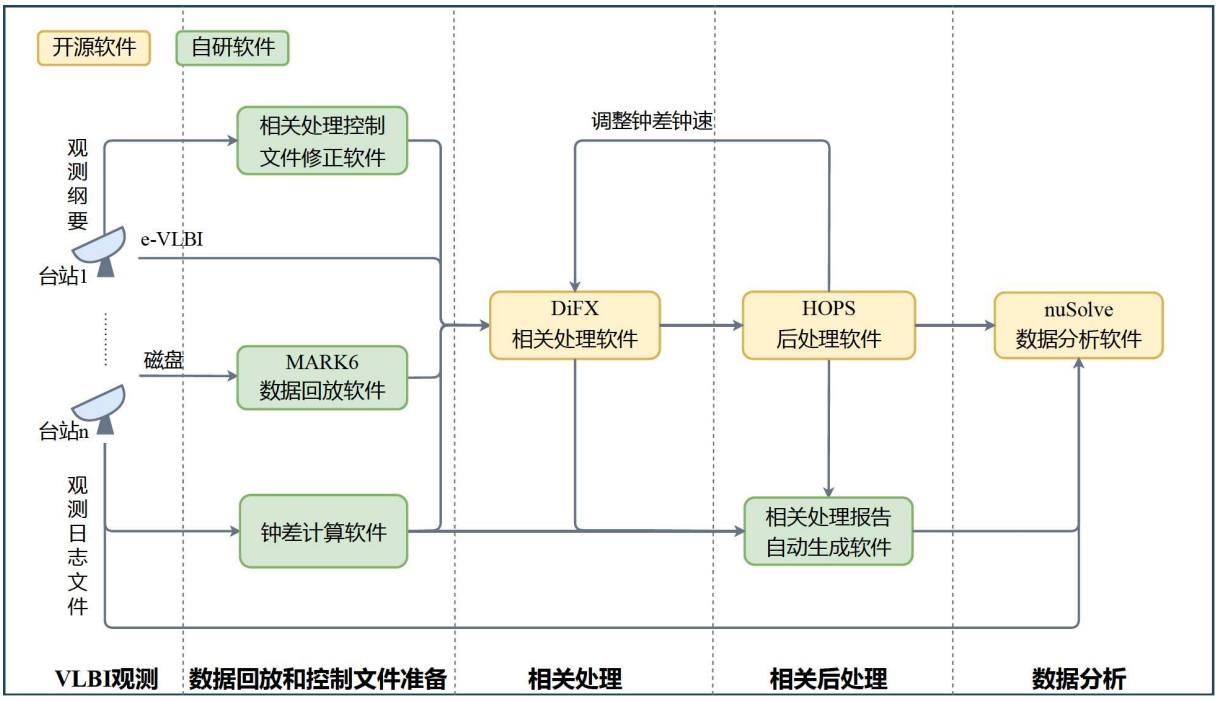


图 2　(网络版彩图)相关处理平台软件系统
Figure 2　(Color online) Software system of the correlator platform.

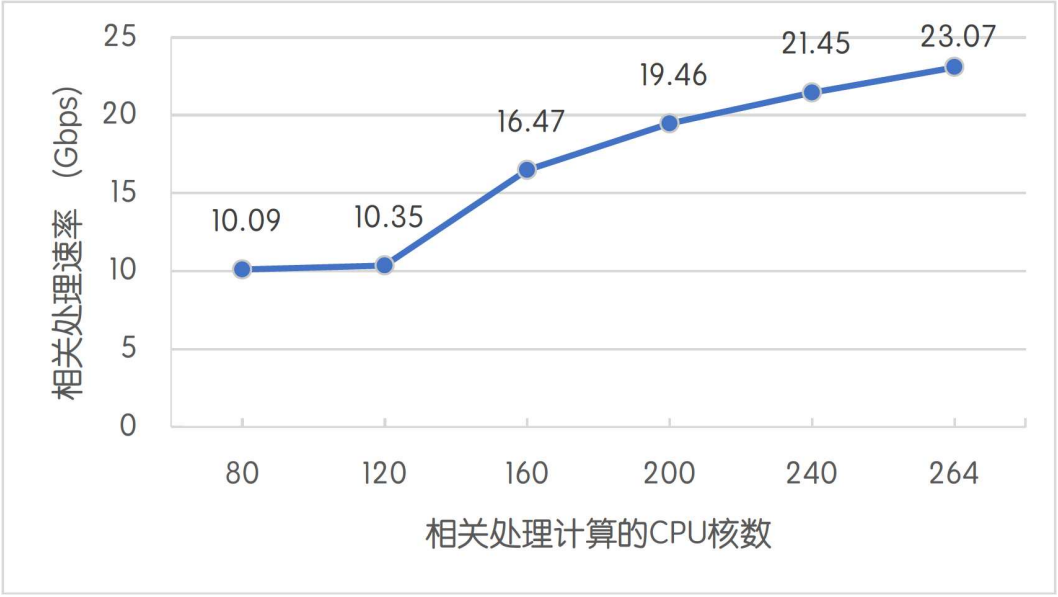


图 3　(网络版彩图)相关处理平台总数据吞吐率测试结果
Figure 3　(Color online) Benchmark results of the total data throughput rate of correlator platform.

相关处理的条纹搜索效率，通常使首次搜索的单通道时延残差控制在1 μs以内，为高成功率的相关处理奠定基础.

(2) 相关处理: 在启动相关处理前, 需完成各台站钟差与钟速的精密调整. 通常选取一个观测质量优良的台站作为参考时钟，利用相关基线的单通道时延观

测值, 对各站的钟差和钟速进行迭代校正, 确保在整个24 h观测实验中, 所有台站的最终单通道时延残差均优于10 ns. 完成钟差与钟速的校正后, 即可对整个实验数据启动相关处理. 本处理采用国际通用的DiFX软件, 该软件是先傅里叶变换后互相关的FX架构, 支持多台站、多极化、多频谱通道的并行计算. 其处理流程包括数据输入、几何时延建模(含相对论和大气修正)、快速傅里叶变换和复可见度计算, 得到每条基线的互相关谱, 最终输出Mk4格式的数据用于相关后处理.

(3) 相关后处理: 相关后处理是分别对X和Ka频段的各个通道进行相位校准(Phase Calibration, PCAL). 首先选择一个相位参考站, 认为该观测站的通道间没有相位差, 根据相关基线挑选一颗强射电源, 分别计算其余观测站在X和Ka频段各个通道需要补偿的相位差, 使得每个频段内的各个通道间的相位对齐, 最后再对整个实验进行条纹拟合.

(4) 数据分析: 将相关后处理条纹拟合得到的观测量数据、电缆时延校正、气象参数数据、时延模型及参数偏导数等写入到vgosDB测地数据库中, 以供后续采用nuSolve软件分析数据. 数据分析过程主要涉及消除模糊度, 双频组合消除电离层效应, 剔除野点, 站坐标、 EOP和射电源位置等解算参数的选取等过程. 本文在解算待求参数时所用的先验文件配置和详细的待求参数设置如下表4所示, 其中台站坐标和EOP参数均固定不解算.

表 4　先验文件和解算参数

Table 4　A priori files and estimation parameters

类别	模型与参数	具体设置
先验文件	历表	DE421
	地球参考架	ITRF2020-2023u
	天球参考架	ICRF3-SX
	先验EOP	USNO finals系列
	岁差/章动	IAU 2006/2000A
	映射函数	NMF
待求参数的设置	时延	群时延
	钟的解算间隔	60 min
	天顶湿延迟解算间隔	60 min
	大气梯度解算间隔	28.8 h
	射电源位置	解算有效观测量大于5个的射电源

表 5　10次X/Ka双频天体观测数据分析结果统计表

Table 5　Statistical summary of the analysis results for ten X/Ka dual-band astrometric observations

实验代码	加权拟后残余时延 (ps)	解算射电源颗数	赤经位置精度中位数 (mas)	赤纬位置精度中位数 (mas)	X/Ka信噪比中位数比值
ST2406	20.5	13	0.67	0.71	6.9
ST2411	16.4	52	0.29	0.35	2.7
ST2413	17.1	58	0.78	1.79	2.9
ST2414	14.0	26	0.16	0.20	2.0
ST2415	13.2	66	0.40	0.89	3.0
C006KA	27.5	58	0.60	0.74	5.0
C007KA	20.1	34	0.49	0.41	4.7
C008KA	21.6	63	0.89	0.96	3.5
C009KA	27.7	57	0.97	1.13	4.1
C010KA	33.5	64	1.29	2.51	4.4

5　结果与讨论

5.1　数据处理结果

基于10次X/Ka双频观测实验, 表5统计了数据分析结果. 各次实验的加权拟后残余时延的中位数约20 ps, 作为比较, 传统S/X双频观测的加权拟后残余时延约25 ps[1,23], 而ICRF3的X/Ka双频观测的加权拟后残余时延是43.6 ps[1], 这表明我国自主的X/Ka双频模式在当前观测条件下已达到较高的时延测量精度. 这主要归因于以下两个因素: 首先, ICRF3-XKa采用少数大口径天线构成的洲际基线, 基线长度超过9000 km, 观测射电源的仰角偏低, 大气时延误差影响更为显著; 其次, 国内观测在Ka频段的有效带宽约0.85 GHz, 是ICRF3中X/Ka观测的5倍左右, 在相同信噪比下, 有效带宽越宽, 时延测量精度越高. 在10次观测实验中, ST2415的加权拟后残余时延最小, 仅13.2 ps, 对应较稳定的观测质量与系统噪声控制.

在射电源解算数量和位置精度方面, ST2406实验受天气影响致使基本只有两个测站维持有效观测, 因此最终仅解算了13颗射电源的位置, 解算得到的天体位置精度中位数在赤经方向为0.16–1.29 mas, 在赤纬方向为0.20–2.51 mas, 所有数据的整体中位数分别为赤经精度0.64 mas、赤纬精度0.82 mas, 表明多数实验的定位精度优于1 mas, 体现了X/Ka频段高频观测对提高天体测量分辨率的潜力. 表5的统计结果显示, 加权拟后残余时延与射电源的定位精度之间存在显著正相关. 其中, 与赤经位置精度中位数的相关系数为0.82,

与赤纬位置精度中位数的相关系数为0.60，均呈现较强的相关性.

此外，根据表5的信噪比统计(不含观测条件受限的ST2406实验)，X频段信噪比中位数约为Ka频段的3.5倍. 即便Ka频段的观测宽带是X频段的3倍，其信噪比仍显著低于X频段，反映出Ka波段射电源信号较弱、探测难度较大的特点. 该差异在图4所示的ST2413实验信噪比分布中亦得到印证：X波段信噪比中位数为146，而Ka波段仅为51，进一步验证了Ka波段在相同观测条件下信噪比明显偏低的现象. 这些结果可为VLBI观测策略的优化提供依据，尤其在观测频率选择与观测时长配置方面具有参考价值.

5.2　射电源探测结果与分布特征

基于国内自主实施的10次X/Ka双频VLBI观测，共成功探测到107颗射电源，构成首个由中国VLBI网(Chinese VLBI Network，CVN)在该频段组合下独立获取的射电源样本(CVN-XKa). 图5展示了107颗射电

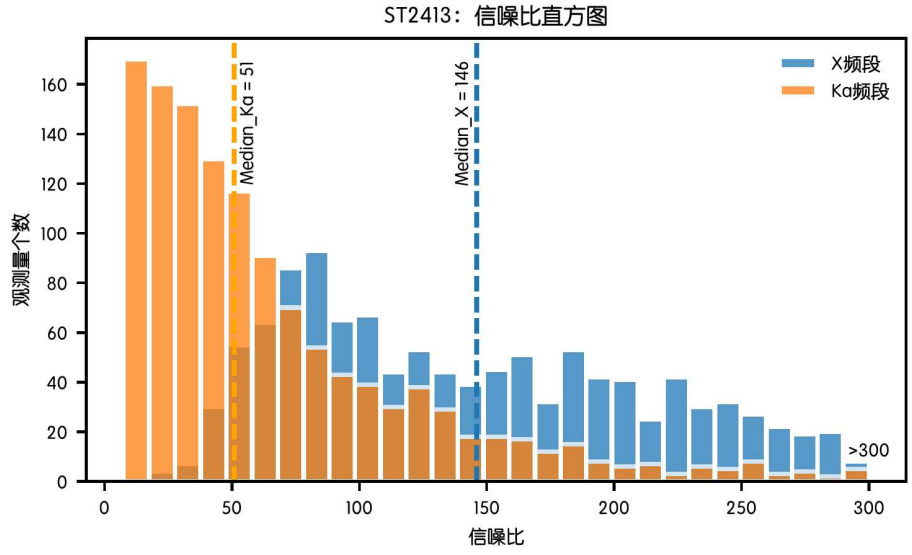


图 4　(网络版彩图) ST2413 X/Ka双频天体测量信噪比直方图
Figure 4　(Color online) Histogram of fringe SNRs for the ST2413 X/Ka dual-band astrometric observation.

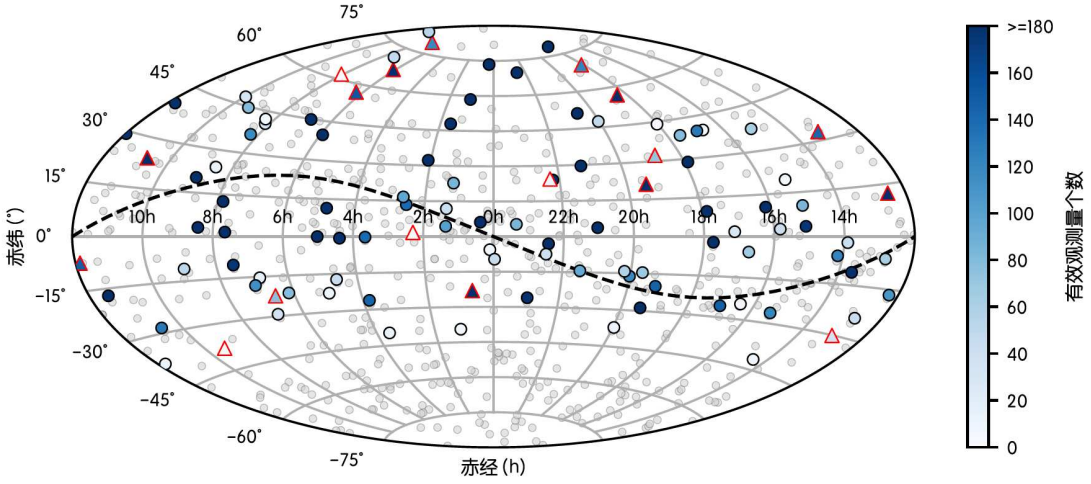


图 5　(网络版彩图) CVN-XKa射电源的天球位置分布图
Figure 5　(Color online) Celestial distribution of CVN-XKa radio sources.

源的天球位置分布图, 其中蓝色圆点显示了89颗已被ICRF3-Xka收录的射电源, 三角形突出显示了18颗未被ICRF3-XKa收录的射电源, 灰色圆点代表ICRF3-XKa的678颗射电源, 黑色的虚线为黄道. 基于18颗新增射电源与ICRF3-XKa源表中最邻近源之间的角距统计, 其平均值为4.21°, 中位数为3.94°, 最大值为7.85°, 最小值为0.24°. 其中有6颗源的最小角距大于6°, 且其中3颗大于7°, 这些射电源有助于改善ICRF3-XKa空间分布的均匀性. 由于参与观测的射电望远镜均位于北半球, 受限于地理几何的约束, 当前VLBI观测站网的探测范围仅限于赤纬−45°以北的天区.

如图6所示, 国内自主探测到的CVN-XKa射电源均包含于现有的ICRF3-SX射电源表中, 其中18颗射电源未在ICRF3-XKa射电源表中收录, 占比16.8%, 这为国际扩展X/Ka频段天球参考架提供了独立样本; 其余89颗射电源为ICRF3-SX, ICRF3-XKa与CVN-XKa共有的射电源.

表6统计了10次X/Ka双频VLBI观测实验中107颗射电源的有效观测量个数(即用于射电源位置参数解算的时延观测量个数)分布情况. 所有射电源的总有效观测量个数为16610, 中位数为118. 作为对比, 深空网在168次单基线实验中获得的X/Ka总观测量为69062. 从分布来看, 有效观测量个数在5–50区间的射电源数量最多, 共25颗; 观测量个数少于5的有7颗; 观测量个数超过350的有11颗; 观测量个数在50–350区间内呈阶梯式分布, 各区间数量相对均衡(50–100: 17颗; 100–150: 18颗; 150–250: 15颗; 250–350: 14颗). 有研究表明, 射电源位置精度与有效观测量个数密切相关, 在其他条件相近的情况下, 随着有效观测量个数的增加, 射电源的位置精度会提高[24]. 为提升射电源的位置精度, 后续观测计划将优先增加观测量个数低于50的32颗射电源的观测频次.

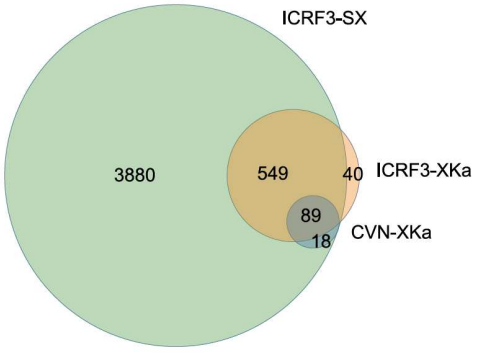


图 6　(网络版彩图) CVN-XKa与ICRF3射电源表中的共同源

Figure 6　(Color online) Common radio sources in the CVN-XKa and ICRF3 catalogs.

表 6　107个射电源的有效观测量个数统计

Table 6　Statistics of the numbers of valid observations for 107 radio sources

有效观测量个数的范围区间	射电源颗数
<5	7
5–50	25
50–100	17
100–150	18
150–250	15
250–350	14
>350	11

5.3　探测灵敏度分析

VLBI观测河外射电源的信噪比$\mathrm{SNR}_{\mathrm{obs}}$估计方法见下[25]:

$$\mathrm{SNR}_{\mathrm{obs}} = qh\frac{S_c}{\sqrt{\mathrm{SEFD}_1\mathrm{SEFD}_2}}\sqrt{2BT}, \tag{1}$$

其中, q为量化损失因子, 用来表示信号量化及相关处理过程导致的量化损失; h为相干损失因子, 通常表示大气扰动等因素导致的干涉条纹在相干积分过程中的信噪比损失; S_c为射电源的相关流量密度, 单位为央斯基(Jy); B为观测带宽, 单位为Hz; T为积分时间, 单位为s; SEFD_1, SEFD_2分别为观测站1和2的系统等效流量密度(System Equivalent Flux Density, SEFD), 单位为Jy.

由式(1)可知, 在射电望远镜性能不变的情况下, 可通过增加观测带宽和积分时间, 进一步提高VLBI的信噪比或探测灵敏度. 但是, 随着积分时间的增加, 大气扰动将导致信噪比损失.

为此, 本文量化评估了相干损失因子与积分时间的关系. 实测数据取自2025年7月15日利用佘山13 m、南山13和26 m射电望远镜对射电源3C84的连续600 s时长的观测. 只观测了2个通道, 每个通道32 MHz带宽, 对应的天空频率分别为31968.00和32000.00 MHz. 针对本次的短时连续观测, 可以认为SEFD和S_c是不变的, 因此式(1)只与积分时间以及相干损失因子有关.

设T_i和h_i分别为积分时间及其对应的相干损失因子. 已知不同积分时间下的观测信噪比SNR_i, 假设30 s积分时间时的信噪比没有相干损失, 即$h_0 = 1$. 以30 s积分时间(T_0)的信噪比SNR_0为参考, 利用式(1)可获得不同积分时间对应的相干损失因子:

$$h_i = h_0 \frac{\mathrm{SNR}_i}{\mathrm{SNR}_0} \sqrt{\frac{T_0}{T_i}}. \tag{2}$$

图7展示了佘山13 m-南山13 m (S6-Um)和佘山13 m-南山26 m (S6-Ur)两条基线在不同积分时间下受到的大气影响, 可以看出大气扰动对信号相干性的影响是显著且时变的. 当积分时间小于180 s时, 随着积分时间的增加, 相干损失因子快速降低; 当积分时间超过180 s时, 相对于30 s积分信噪比的相干损失稳定在60%左右, 并且没有进一步下降, 说明随机因素对精度的影响已不占主导. 鉴于目前观测常用60–120 s的积分, 因此可以考虑适当增加积分时间提高信噪比, 尤其是针对暗弱射电源的观测.

针对美国DSN观测网和国内观测网, 表7列出了基于不同观测配置参数估计的Ka频段条纹信噪比. DSN观测网的天线口径为34 m, 按天线效率40%和Ka频段系统温度100 K计算, 其SEFD为760 Jy, 国内13 m口径射电望远镜的SEFD为5200 Jy, 该值与佘山13 m射电望远镜的实测SEFD接近, 而南山13 m射电望远镜海拔约2000 m, 其实测SEFD值相对较小, 约4000 Jy. DSN观测网在Ka频段采用10个32 MHz带宽的通道, 总带宽为320 MHz. 国内观测网目前采用24个32 MHz带宽的通道, 总带宽为768 MHz, 后续如果采用45个通道, 总带宽可达1440 MHz. 基于前述实测数据分析, 120 s积分时间对应的相干损失因子约0.8, 600 s积分时间对应的

表 7　基于不同观测配置参数的Ka频段条纹信噪比估计

Table 7　Estimated Ka-band fringe SNRs under different observational parameter configurations

观测参数	DSN观测	国内现有观测	灵敏度增强观测
天线口径 (m)	34	13	13
SEFD (Jy)	760	5200	5200
带宽 (MHz)	320	768	1440
积分时间 (s)	120	120	600
相干损失因子	0.8	0.8	0.6
量化损失因子	0.88	0.88	0.88
目标射电源相关流量密度 (Jy)	0.2	0.2	0.2
条纹信噪比	51.3	11.6	26.7

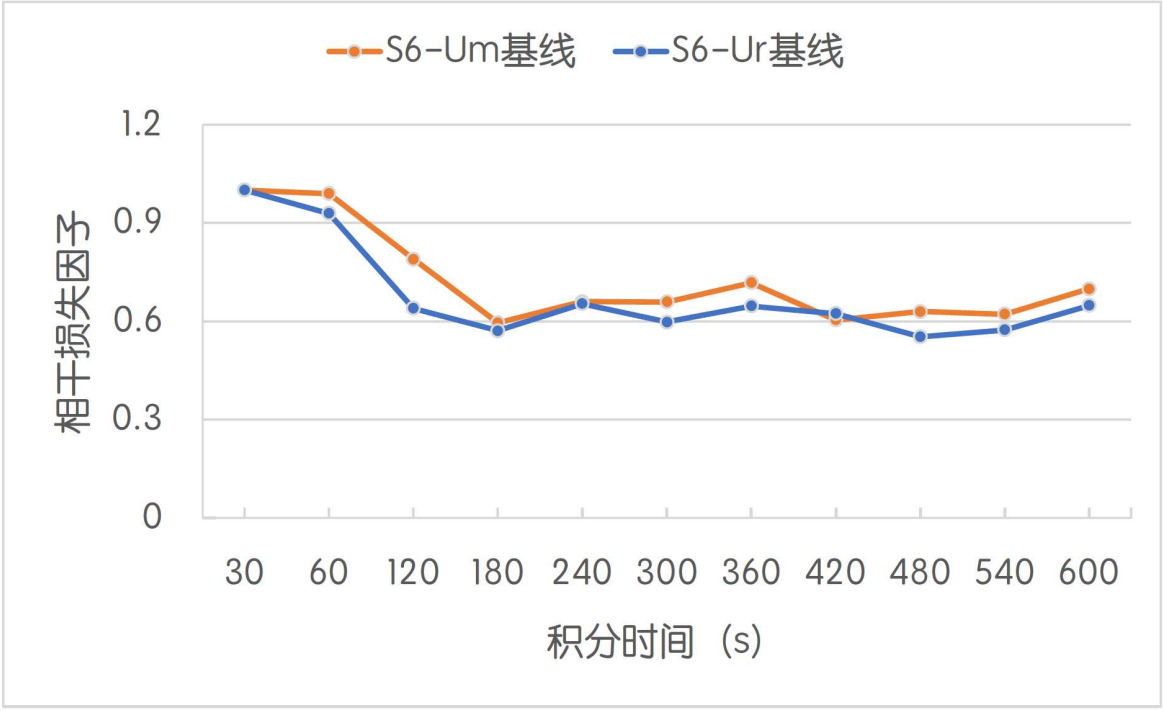


图 7　(网络版彩图) Ka频段的相干损失因子与积分时间的关系

Figure 7　(Color online) Coherence loss factor at Ka-band versus integration time.

相干损失因子约0.6. 所有类型的观测均为2 bit采样, 对应的量化损失因子为0.88. 从表中可以看出, 对于相关流量密度为0.2 Jy的目标射电源, 国内观测网目前获得的信噪比仅11.6, 而DSN观测网的信噪比高约5倍, 意味着该网可探测到流量密度低至0.04 Jy的射电源. 通过增加观测带宽和积分时间, 国内网有望将信噪比提高一倍以上, 探测到小于0.1 Jy的暗弱射电源, 从而大大增加可探测的射电源数量.

6　总结

基于国内13 m射电望远镜站网, 在国内首次开展了X/Ka双频VLBI绝对天体测量观测实验. 自主搭建了国内首套X/Ka双频天体测量专用数据处理平台, 建立了国内首套标准化X/Ka双频数据处理流程. 干涉测量数据吞吐率高达23 Gbps, 满足5台站、每台站4 Gbps的高通量相关处理需求.

基于10次观测数据的处理和分析, 单次24 h观测实验的加权拟后残余时延的中位数约20 ps, 射电源角位置精度在赤经方向上的中位数为0.64 mas、赤纬方向上的中位数为0.82 mas, X频段信噪比中位数约为Ka频段的3.5倍. 在108个X/Ka频段的目标射电源中, 成功探测到107颗, 其中18颗未被ICRF3-XKa射电源表收录, 占已探测射电源总数的16.8%, 为扩展X/Ka频段天球参考架提供了独有样本.

与美国DSN单基线观测模式相比, 尽管国内13 m射电望远镜口径较小, 但通过3–5站组网观测、增加观测带宽和积分时间, 还可显著提升暗弱射电源的探测能力. 目前国内网可探测到流量密度约0.2 Jy的射电源, 经观测策略优化后, 其探测极限有望进一步提升至0.1 Jy, 从而显著增加射电源的探测数量.

在国际上普遍使用深空站34 m大口径天线的背景下, 首次验证了基于国内13 m小口径射电望远镜实现高精度X/Ka双频天体测量的可行性, 为自主构建X/Ka波段天球参考架及支撑未来Ka波段深空导航任务奠定了技术基础.

致谢　本研究的观测数据均在上海天文台射电星表数据处理平台完成相关处理. 谨向上海天文台有关工作人员致以衷心感谢, 感谢天线观测人员在观测实施与数据采集中的辛勤工作, 感谢数据处理平台研制与测试人员在平台建设和功能验证中的重要贡献, 感谢平台运维人员在运行保障和技术支持方面提供的有力支持.

参考文献

1　Charlot P, Jacobs C S, Gordon D, et al. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry. Astron Astrophys, 2020, 644: A159
2　de Witt A, Charlot P, Gordon D, et al. Overview and status of the international celestial reference frame as realized by VLBI. Universe, 2022, 8: 374
3　Sokolovsky K V, Kovalev Y Y, Pushkarev A B, et al. A VLBA survey of the core shift effect in AGN jets. Astron Astrophys, 2011, 532: A38
4　Charlot P, Boboltz D A, Fey A L, et al. The celestial reference frame at 24 and 43 GHz. II. Imaging. Astron J, 2010, 139: 1713–1770
5　Liu N, Lambert S B, Charlot P, et al. Comparison of multifrequency positions of extragalactic sources from ICRF3 and *Gaia* EDR3. Astron Astrophys, 2021, 652: A87
6　Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. *Gaia* early data release 3: Summary of the contents and survey properties. Astron Astrophys, 2021, 649: A1
7　García-Miró C, Jacobs C S, Clark J E, et al. The X/Ka-band extragalactic reference frame. In: Proceedings of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting. 2012. 347–351
8　Doria I, Cappuccio P, Durante D, et al. Comparison of plasma calibration techniques to enhance radiometric observables performance: BepiColombo MORE test case. Radio Sci, 2025, 60: e2025RS008441
9　Whitney A R, Lapsley D E, Taveniku M. Mark 6: A next-generation VLBI data system. In: Proceedings of the 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. 2011. 31–34
10　Jacobs C, Bach U, Colomer F, et al. The potential for a Ka-band (32 GHz) worldwide VLBI network. In: Proceedings of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2012 General Meeting. 2012. 194–198

11 Jacobs C S. Ka-band radio source catalog. In: Anzuela C, ed. DSN Telecommunications Link Design Handbook. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2020

12 Jacobs C S, Clark J, García-Miró C, et al. The celestial reference frame at X/Ka-band (8.4/32 GHz). In: Altamimi Z, Collilieux X, eds. Reference Frames for Applications in Geosciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 191–196

13 Shu F, Petrov L, Jiang W, et al. VLBI ecliptic plane survey: VEPS-1. Astrophys J Suppl Ser, 2017, 230: 13

14 Wu D, Shu F C, Gan J Y, et al. High sensitivity astrometry of 87 radio sources in the southern hemisphere (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 249511 [吴德, 舒逢春, 甘江英, 等. 87颗南天区射电源的高灵敏度天体测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 249511]

15 Wu D, Shu F C, Li J L, et al. Calculation of horizon mask angles for VGOS antennas and its impact on UT1 determination (in Chinese). Acta Geod Cartogr Sin, 2022, 51: 2285 [吴德, 舒逢春, 李金岭, 等. VGOS天线地平遮挡角计算及其对UT1测量的影响. 测绘学报, 2022, 51: 2285]

16 Sun Z M, Fan H P. Research progress of the VLBI Global Observing System (VGOS) (in Chinese). Acta Geod Cartogr Sin, 2017, 46: 1346–1353 [孙中苗, 范昊鹏. VLBI全球观测系统(VGOS)研究进展. 测绘学报, 2017, 46: 1346–1353]

17 Li J L, Wei E H, Sun Z M, et al. Discussion on the future construction of China's astrometric and geodetic VLBI network (in Chinese). Geomatics Inf Sci Wuhan Univ, 2010, 35: 670–673 [李金岭, 魏二虎, 孙中苗, 等. 关于我国天测与测地VLBI网络未来建设的讨论. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35: 670–673]

18 Deller A T, Brisken W F, Phillips C J, et al. DiFX-2: A more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator. Publ Astron Soc Pac, 2011, 123: 275–287

19 Keimpema A, Kettenis M M, Pogrebenko S V, et al. The SFXC software correlator for very long baseline interferometry: Algorithms and implementation. Exp Astron, 2015, 39: 259–279

20 Bernhart S, Choi Y K, Rottmann H, et al. Status report of the Bonn correlator. In: Proceedings of the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2024 General Meeting. 2025. 118–121

21 Titus M, Barrett J, Cappallo R, et al. MIT Haystack Observatory correlator report 2019–2020. In: Behrend D, Armstrong K L, Baver K D, eds. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2019+2020 Biennial Report. Westford: MIT Haystack Observatory, 2021

22 Feng H T, Shu F C, He X. Accuracy analysis of clock offset compensation at the Shanghai Sheshan VLBI station (in Chinese). Geomatics Inf Sci Wuhan Univ, 2021, 46: 1148–1153 [冯浩通, 舒逢春, 何旋. 上海佘山VLBI站的钟差补偿精度分析. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46: 1148–1153]

23 Anderson J M, Xu M H. Source structure and measurement noise are as important as all other residual sources in geodetic VLBI combined. JGR Solid Earth, 2018, 123: 10162–10190

24 Malkin Z. Evolution of the radio source position uncertainties in radio astrometric catalogs over the past three decades. Res Astron Astrophys, 2026, 26: 015014

25 Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Cham: Springer International Publishing, 2017

X/Ka dual-band astrometry based on high-throughput correlation processing technique

HE Xuan[1,2], SHU FengChun[1,3*], TONG FengXian[1,3], JIANG Wu[1], GAN JiangYing[1], HUANG YiDan[1,3], LIU Cong[1], LIU YuWei[1], SUN ZhengXiong[1], WAN ChengKai[1], LI JinLing[1] & QI ChaoXiang[1,2]

[1]*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*
[2]*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
[3]*Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China*
**Corresponding author (email: sfc@shao.ac.cn)*

To meet the requirements of high-precision X/Ka-band astrometry and Ka-band deep-space navigation, ten sessions of VLBI absolute astrometric observations were conducted for the first time in China using a network of 13-m radio telescopes. A dedicated data-processing platform was independently developed, achieving high-throughput correlation with an interferometric data throughput of up to 23 Gbps, and the standardized X/Ka dual-band data-processing pipeline was established. The results show that 107 out of 108 target radio sources were successfully detected. Among them, 18 sources are not included in the ICRF3-X/Ka catalog, accounting for 16.8% of all detected sources and providing unique samples for the densification of the X/Ka-band celestial reference frame. The median weighted post-fit residual delay over the ten observing sessions is about 20 ps, better than the typical value of about 25 ps for conventional S/X dual-band observations and significantly better than 43.6 ps achieved by the Deep Space Network's X/Ka dual-band measurements. The median single-session position precisions of radio sources are 0.64 mas in right ascension and 0.82 mas in declination, indicating that the X/Ka dual-band astrometry has reached a relatively high precision under the current observing conditions. Furthermore, the Ka-band detection sensitivity of the domestic observing network was quantitatively evaluated. By increasing the integration time and observing bandwidth, the flux-density detection limit of the current network can be improved from approximately 0.2 to 0.1 Jy. These results demonstrate our independent capabilities in X/Ka dual-band observations and high-precision data processing, which will support the construction and refinement of the X/Ka-band celestial reference frame.

X/Ka dual-band observations, very long baseline interferometry, celestial reference frame, data correlation, astrometry

PACS: 95.10.Jk, 95.55.Br, 95.75.Kk, 95.55.Jz, 95.75.-z

doi: 10.1360/SSPMA-2026-0066