



中国科学院国家天文台

NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, CAS

SKA专项“脉冲星测时和引力理论检验”项目 进展

李柯伽

北京大学

中国科学院国家天文台



2024年7月



项目指标简介

- 课题一： 完成9000个天线的所有射频前端部件，组阵，采集数据，开展科学研究
- 课题二： 对四个以上SKA-mid波段望远镜开展组阵脉冲星观测，理解如何校准SKA天线
- 课题一、课题二： 搜寻纳赫兹引力波
- 课题三： 实现脉冲星时间标准
- 课题四： 实现国内望远镜的宽带VLBI观测
- 课题四： 实现天体坐标架链接



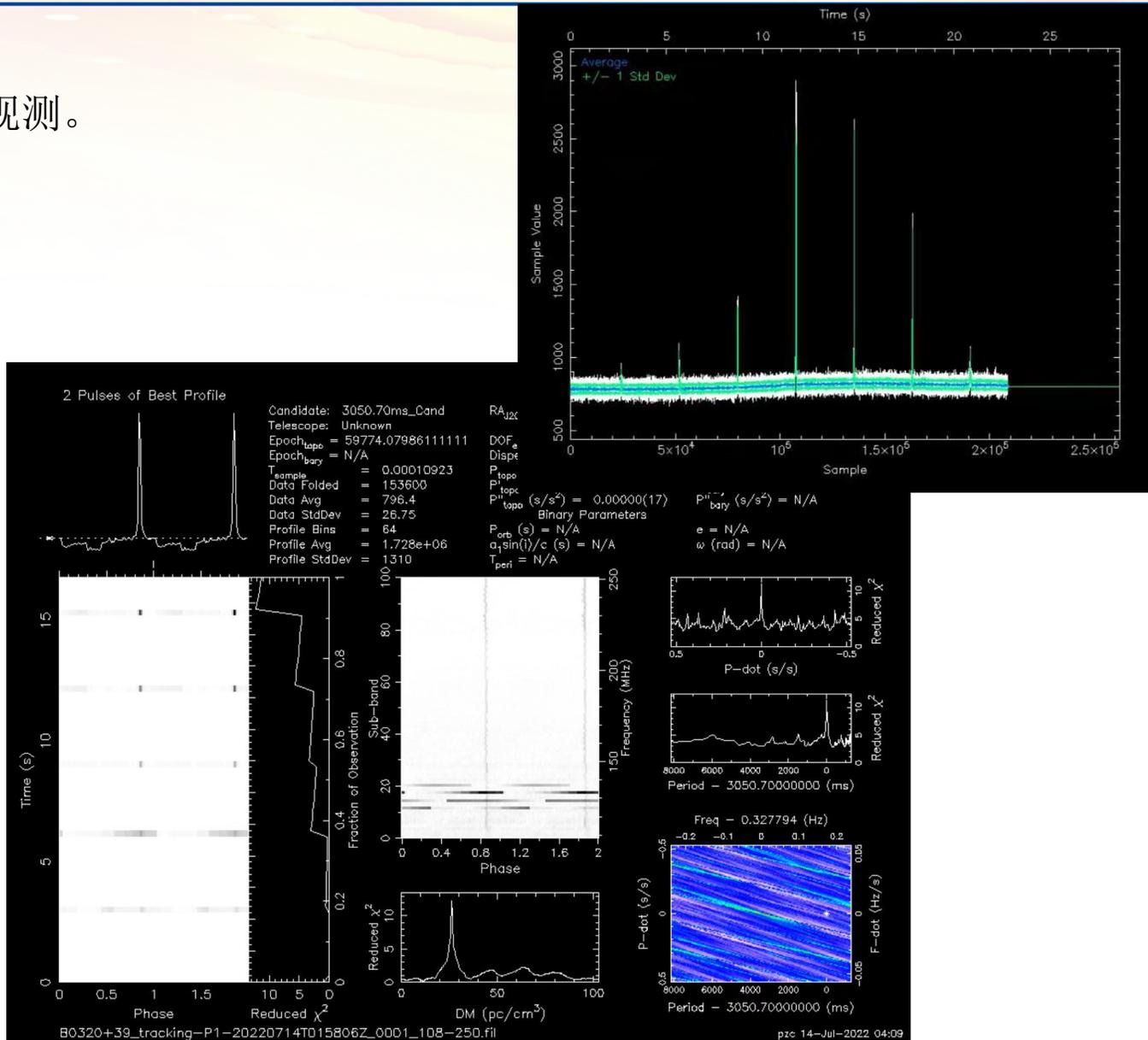
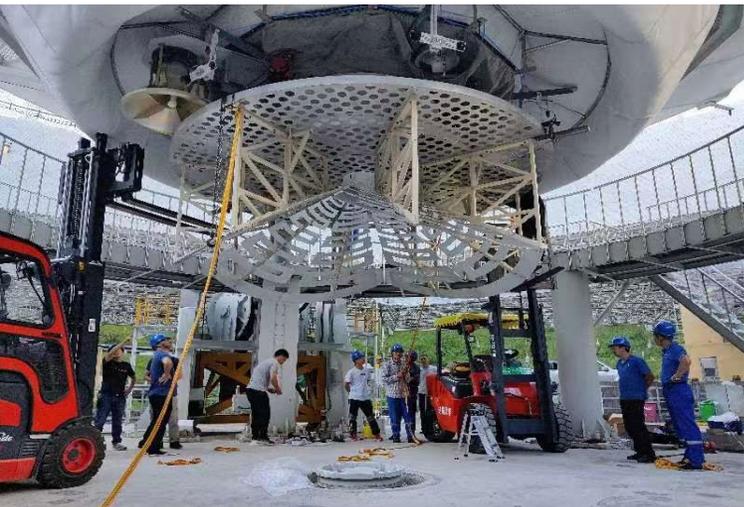
项目简介

- 课题一： 完成9000个天线的所有射频前端部件，组阵，采集数据，开展科学研究
- 课题二： 对四个以上SKA-mid波段望远镜开展组阵脉冲星观测，理解如何校准SKA天线
- 课题一、课题二： 搜寻纳赫兹引力波
- 课题三： 实现脉冲星时间标准
- 课题四： 实现国内望远镜的宽带VLBI观测
- 课题四： 实现天体坐标架链接

2022年7月份实现了50-250MHz SKA low波段内脉冲星观测。

结论:

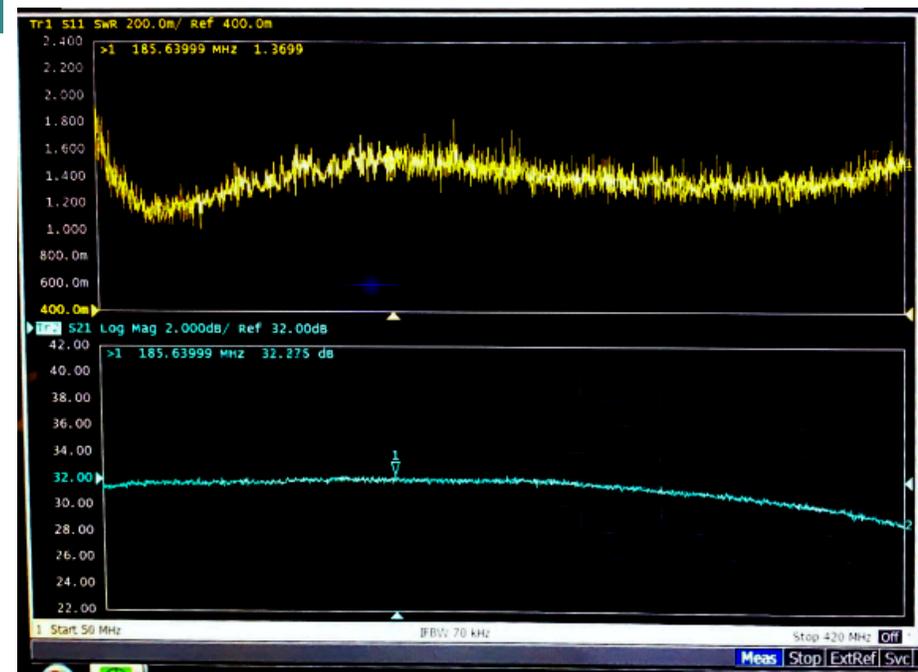
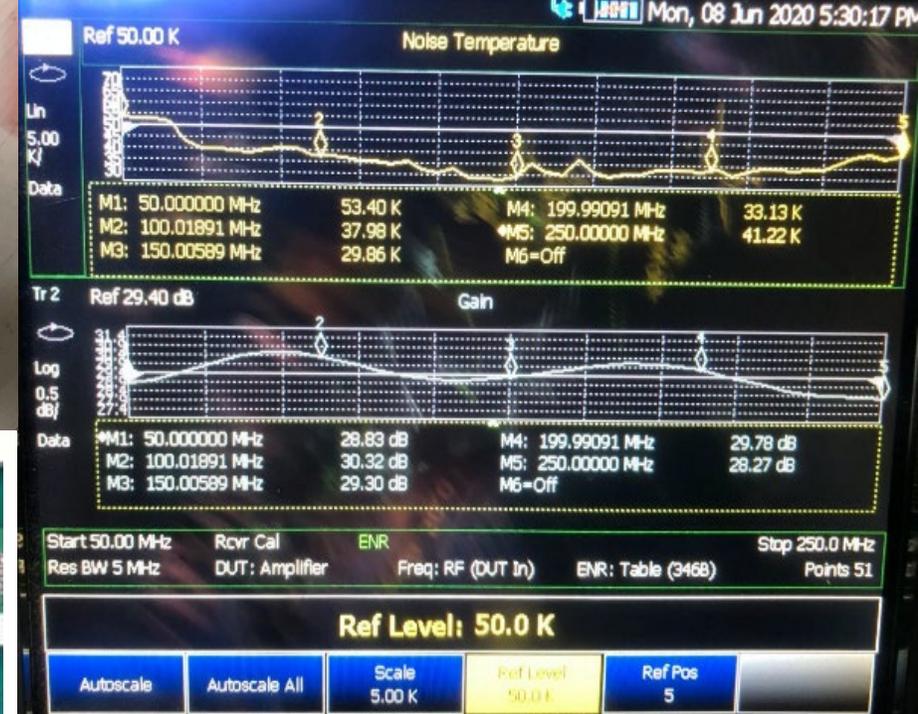
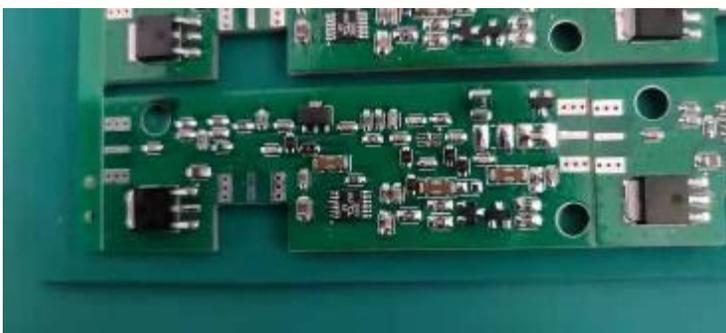
1. **这个波段脉冲星可以观测。**
2. 部分掌握了数据处理
3. 阵列望远镜数据处理还需要研究





低噪声放大器

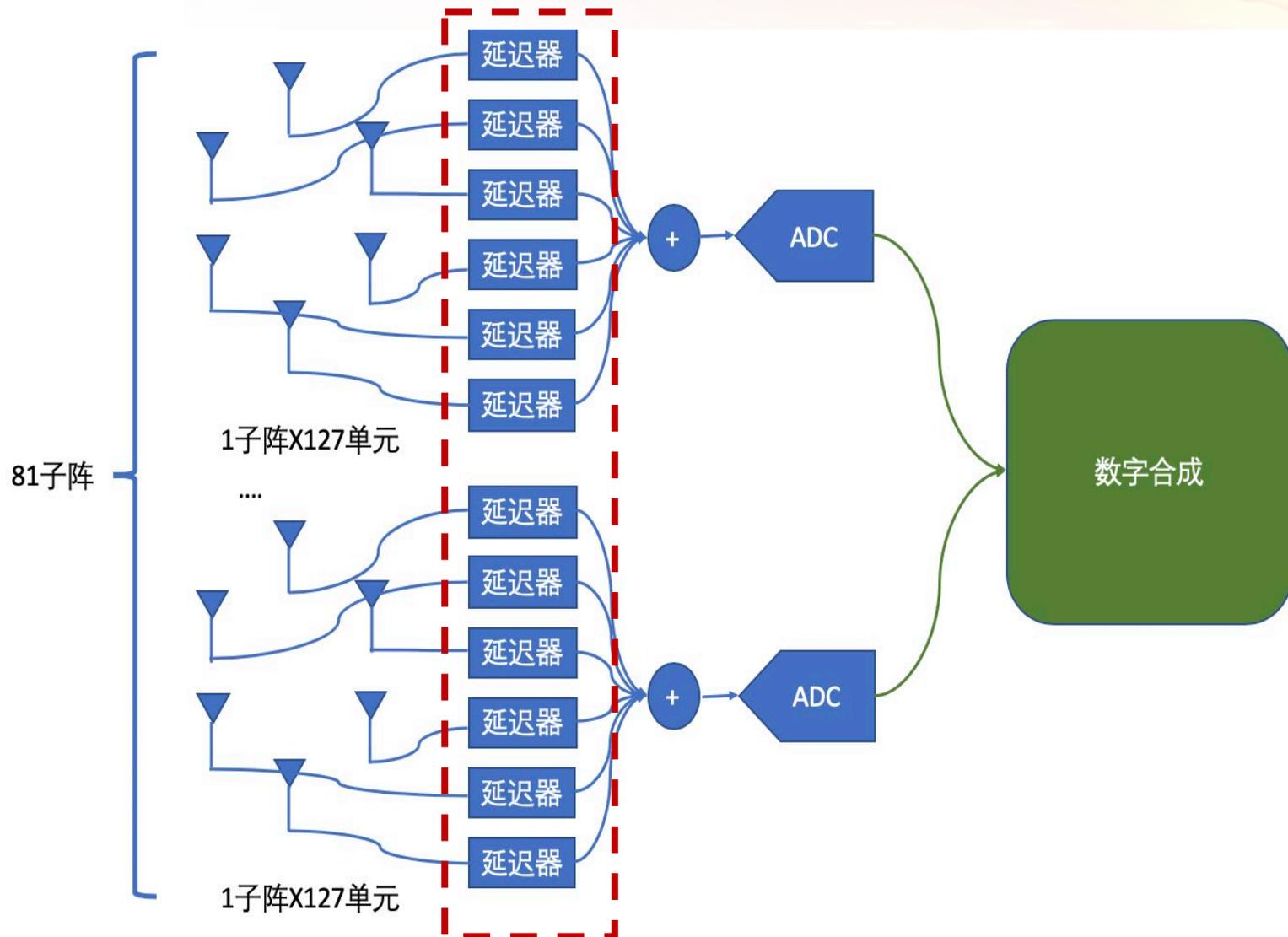
- 设计了达到最终指标的放大器
- 完成了生产工艺开发
- 实现量产
- 测量过程见演示



1: 基于 21CMA 实现 SKA-low 频段的脉冲星测时	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input checked="" type="checkbox"/> 新产品 <input checked="" type="checkbox"/> 新技术 <input checked="" type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input checked="" type="checkbox"/> 数据库 <input checked="" type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 专利 <input checked="" type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 其他	课题 1	指标 1.1: 无线电特性指标、观测数据量、论文与技术报告	/	带内最坏噪声 <70K 频段: 50MHz-250MHz 带宽 50MHz 数据量: 40TB 论文 1-2 篇	带内最坏噪声 <50K 频段: 50MHz-250MHz 带宽 200MHz 数据量 200TB 论文技术报告 5-10 篇。	国内外同行评议的技术报告、性能参数测量和现场测试
---------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------	-------------------------------	---	----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------	--------------------------

完成了噪声指标和带宽指标

SKA-low 方案





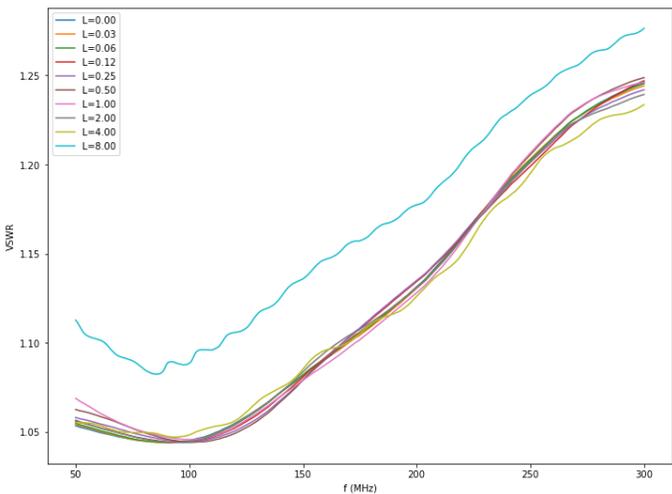
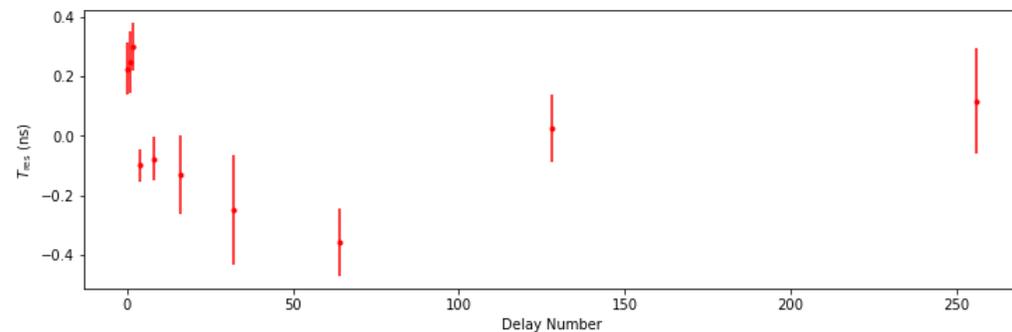
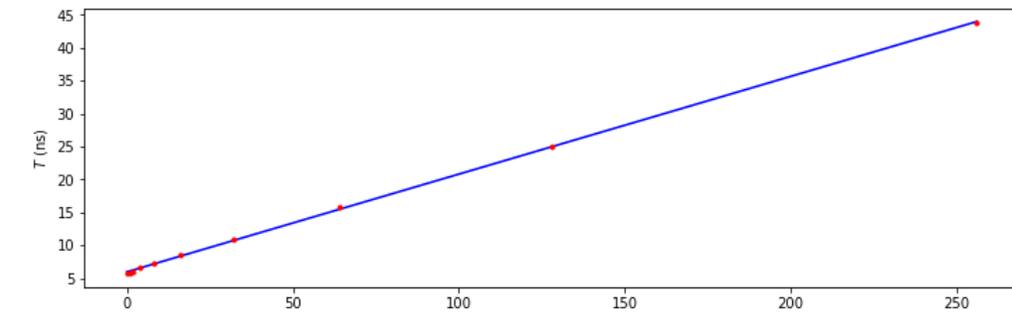
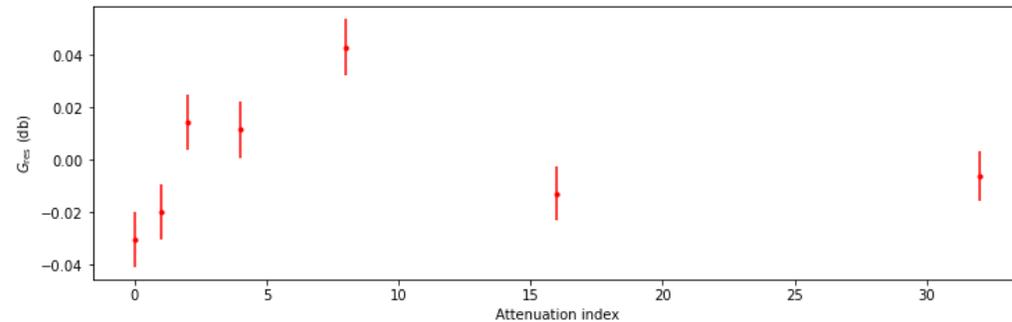
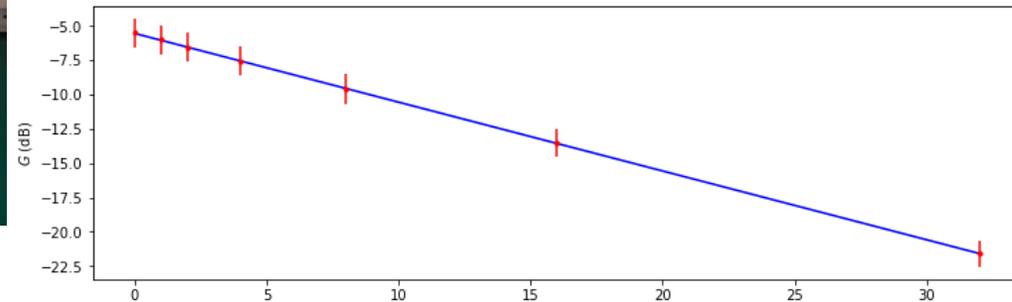
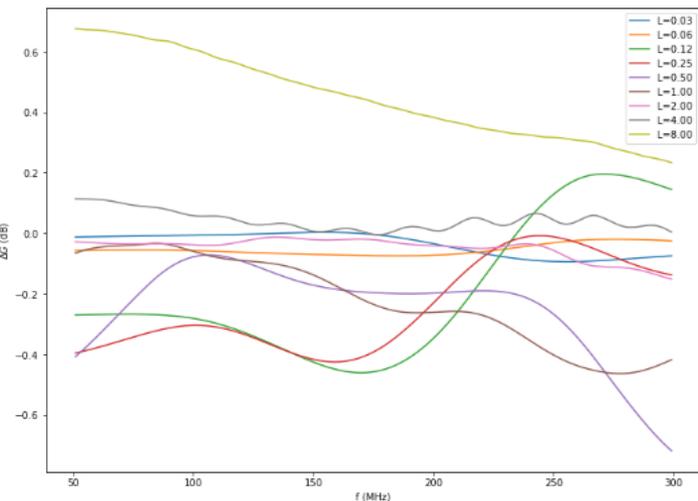
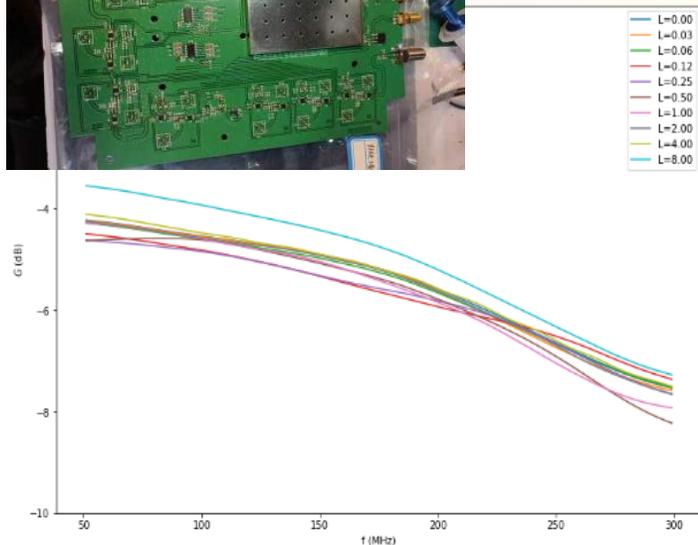
可变延迟器



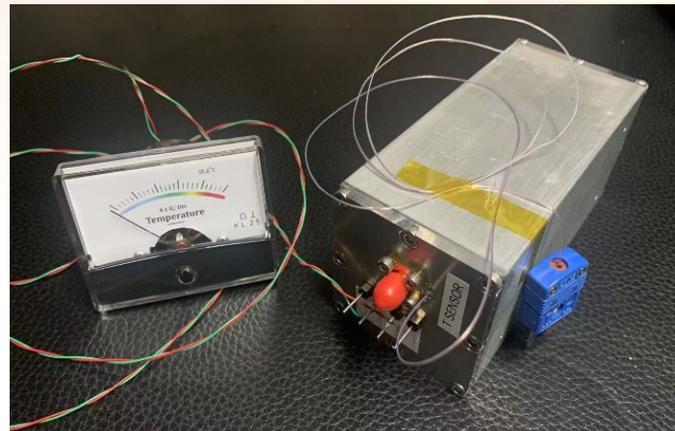
实测和设计目标的偏差小于0.05dB（带通内平均后）。不同延迟条件下波束合成单元的端到端衰减变化优于0.5dB

时间延迟实测和设计值的差，加权RMS差异小于100ps，预期的信号合成相干度将优于98%。

- 达到设计目标
- 完成了生产工艺开发
- 成功量产

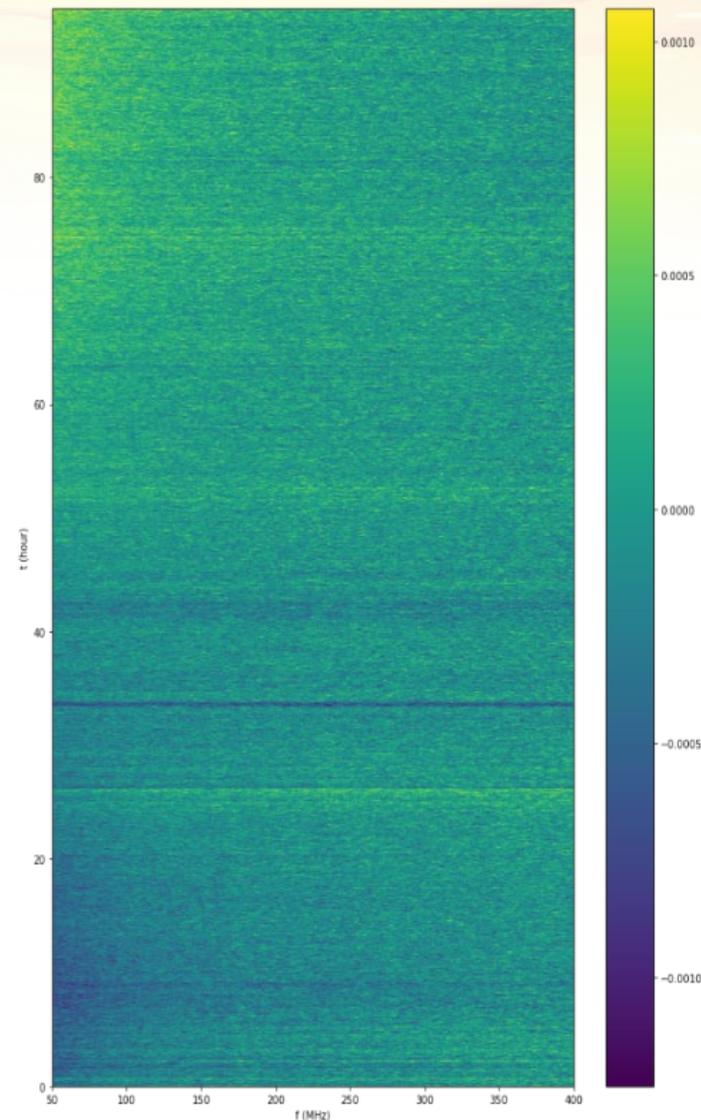
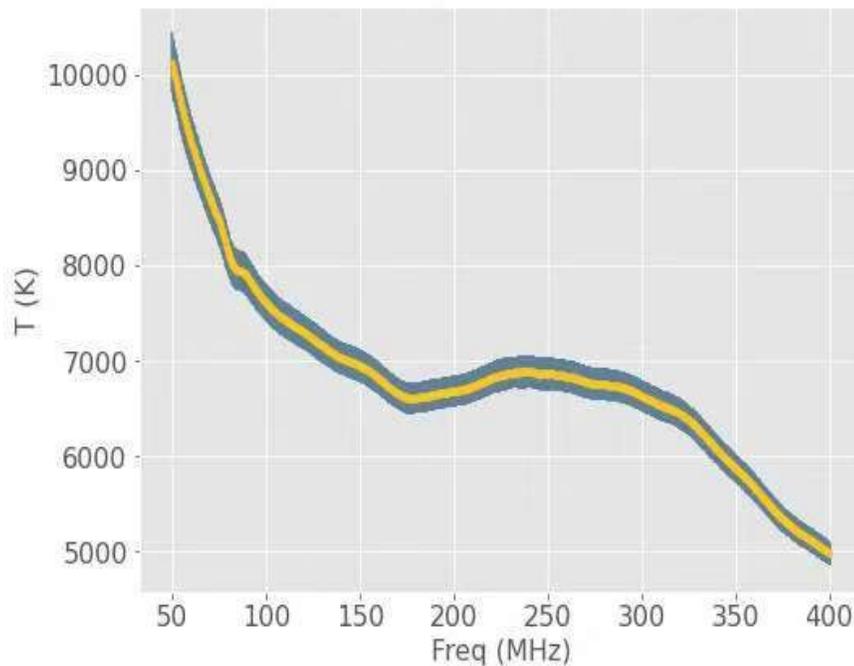


最好的噪声源货架产品温度变化20度产生2%误差，不能满足定标需求。此外超噪比太低，无法应用。国外有利用真空热电阻的设计报道，但是试验后发现稳定性难以保证，需要频繁定标。



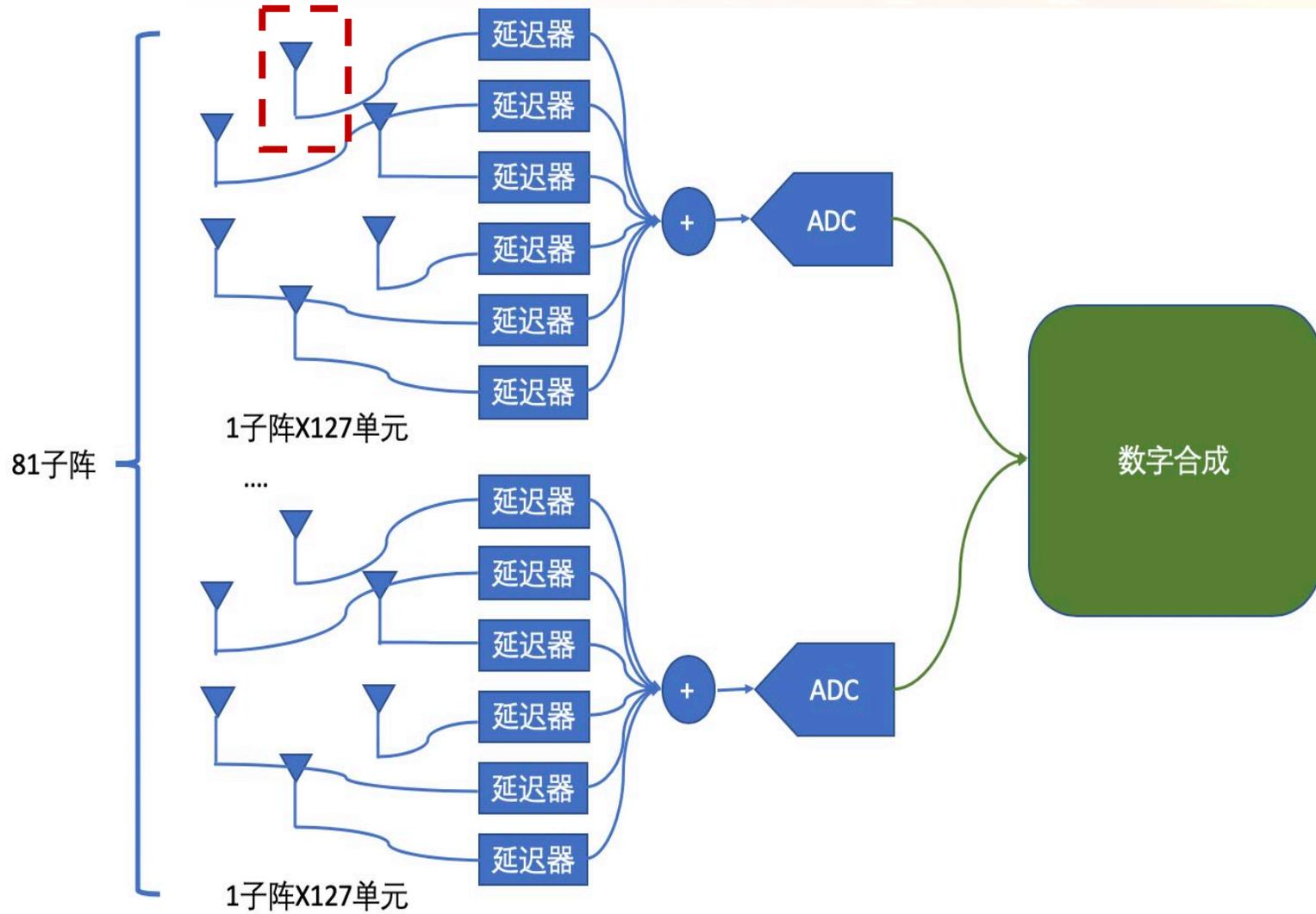
我们的设计：

- 高精度恒温、固态噪声源
- 全模拟设计，避免额外电磁干扰
- $VSWR < 1.12$
- 实现了0.01%稳定度（90小时测试）
- 超噪比高于银河系前景，满足SKA-low需求。



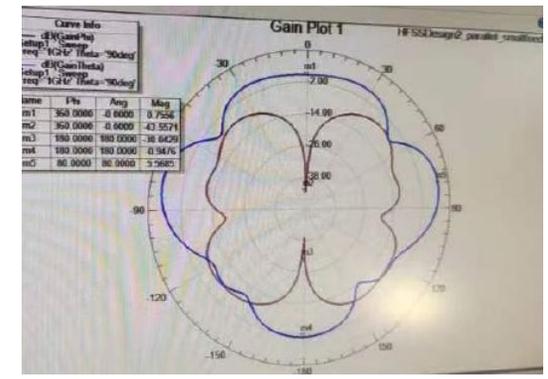
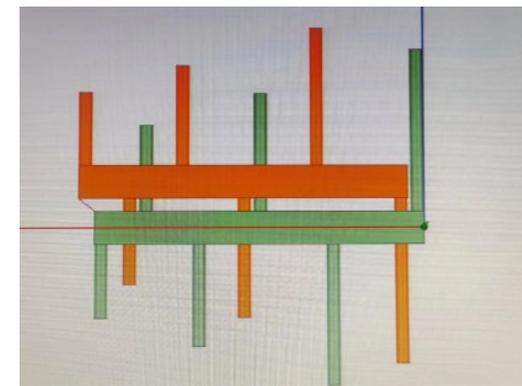
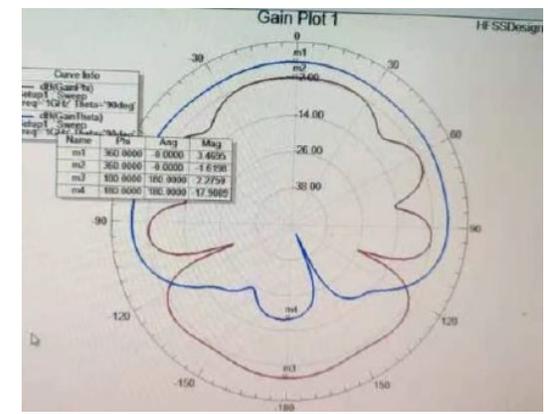
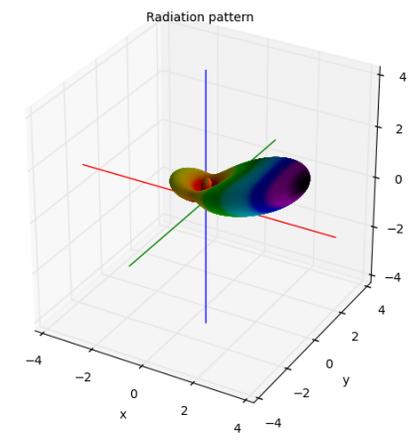
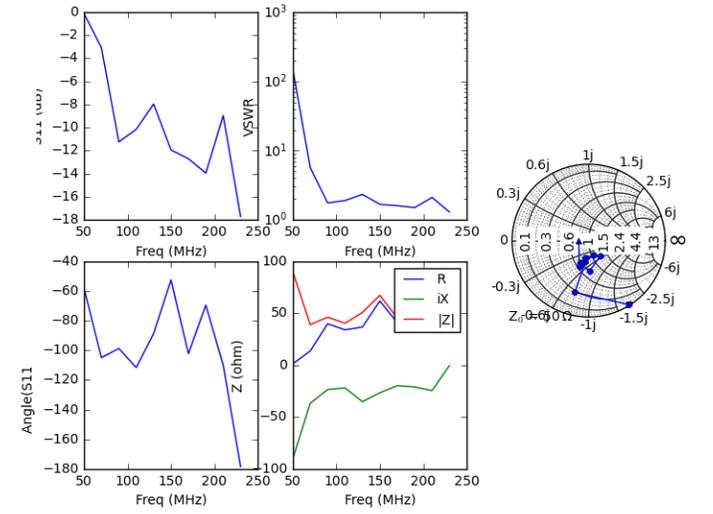
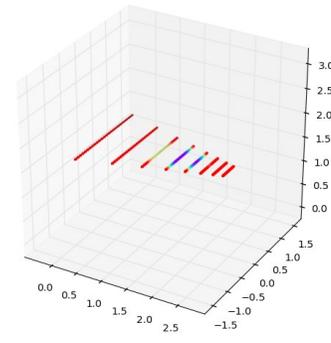


SKA-low 方案



优化天线系统

- 对数周期天线偏振响应不是很好
- 改用新结构似乎能够有效提高偏振响应
- 自主研发计算电磁学软件
- 理解在SKA设计下的校准问题

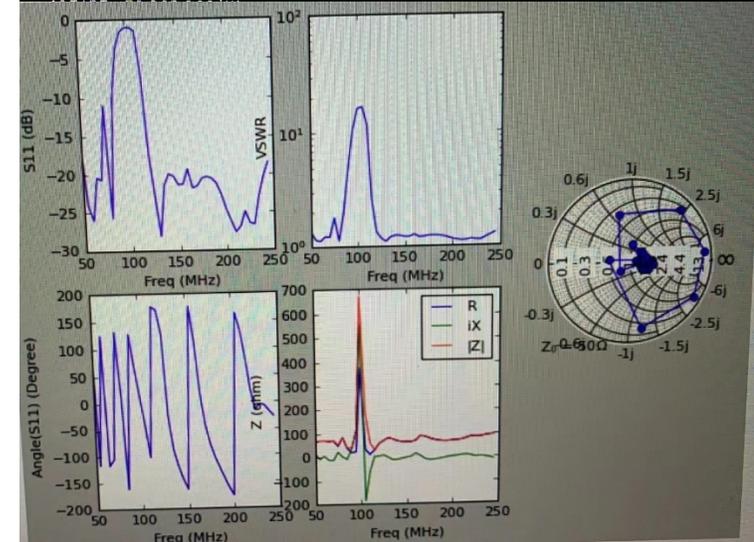
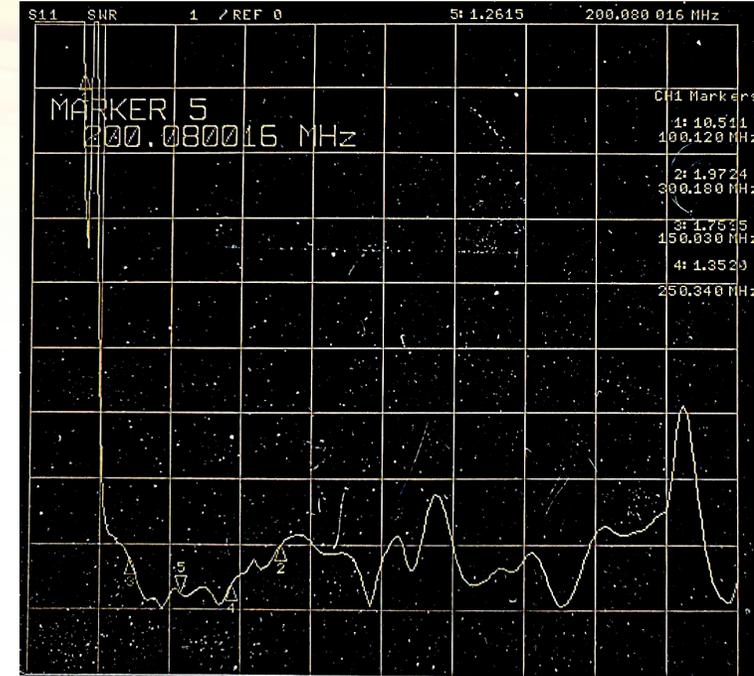




天线实测

- 120-300MHz 驻波比低于2.0
- 120-700MHz 驻波优于2.5
- 80-100MHz 驻波比高于10 压制FM干扰

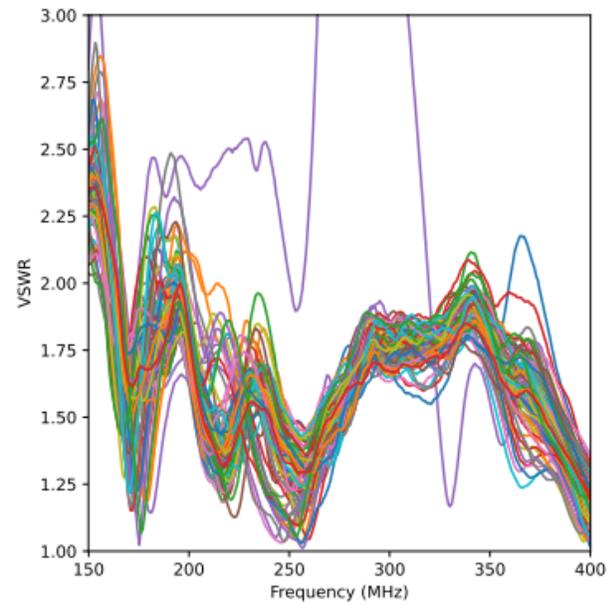
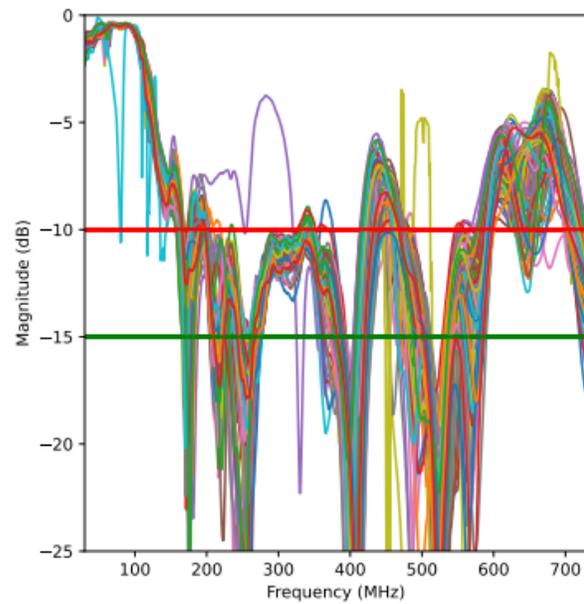
天线单元设计达到需求



云南台先导阵试验

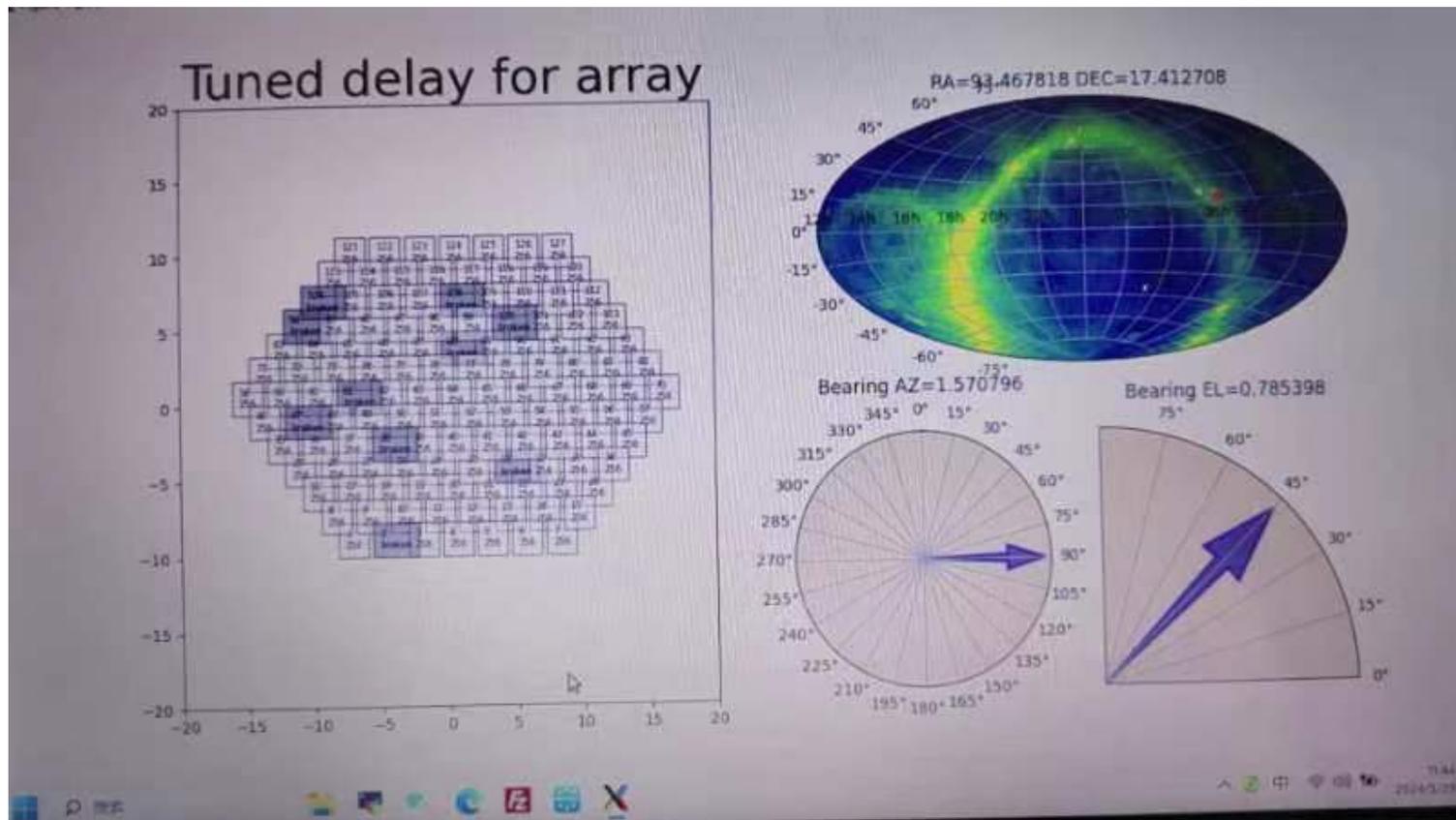
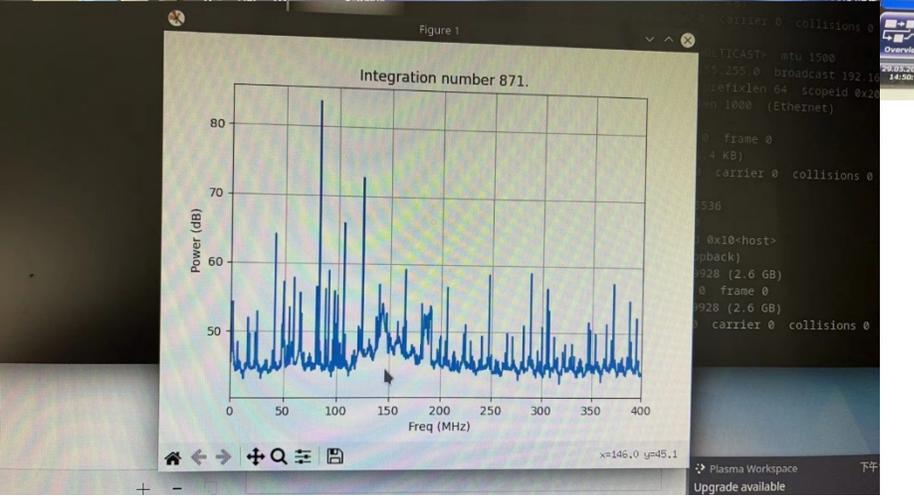


Antennaoverall





数字接收机、天线控制软件



建设花絮



盖房子第一步，测绘



做不裂的位置正确的水泥墩



拧更多的螺丝

拧更多更多的螺丝



接电线，做接头



拧螺丝



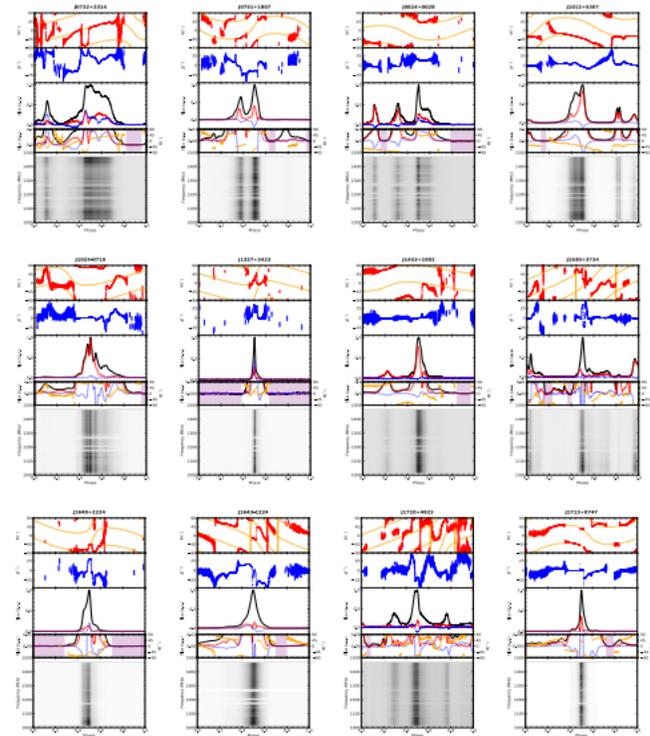
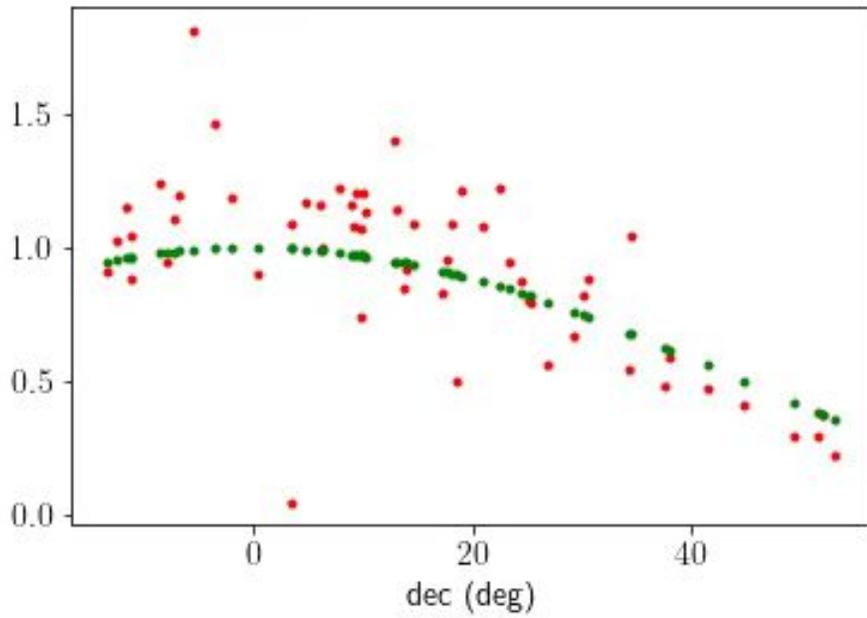
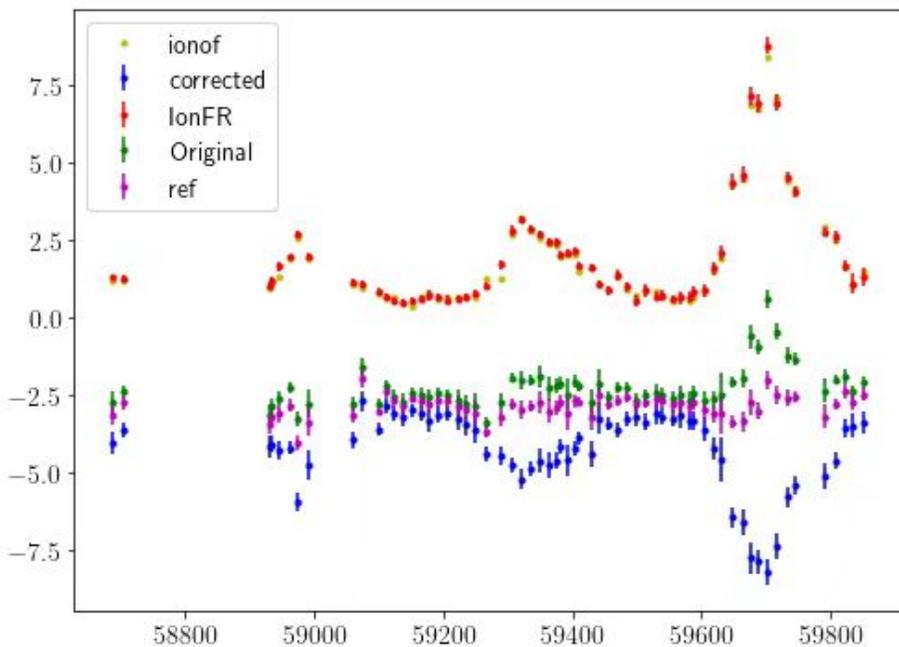
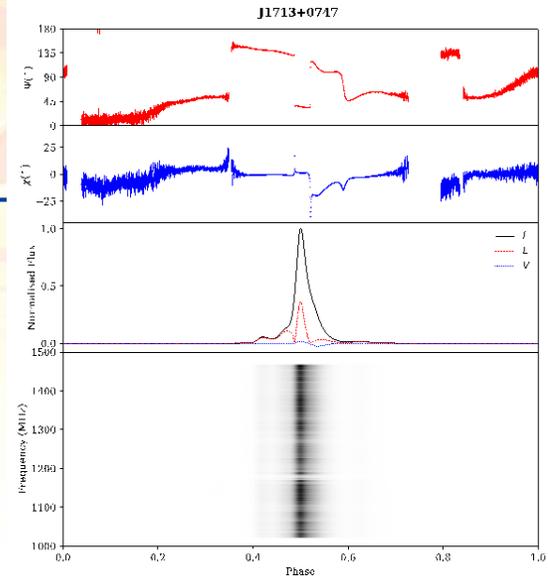


SKA mid band

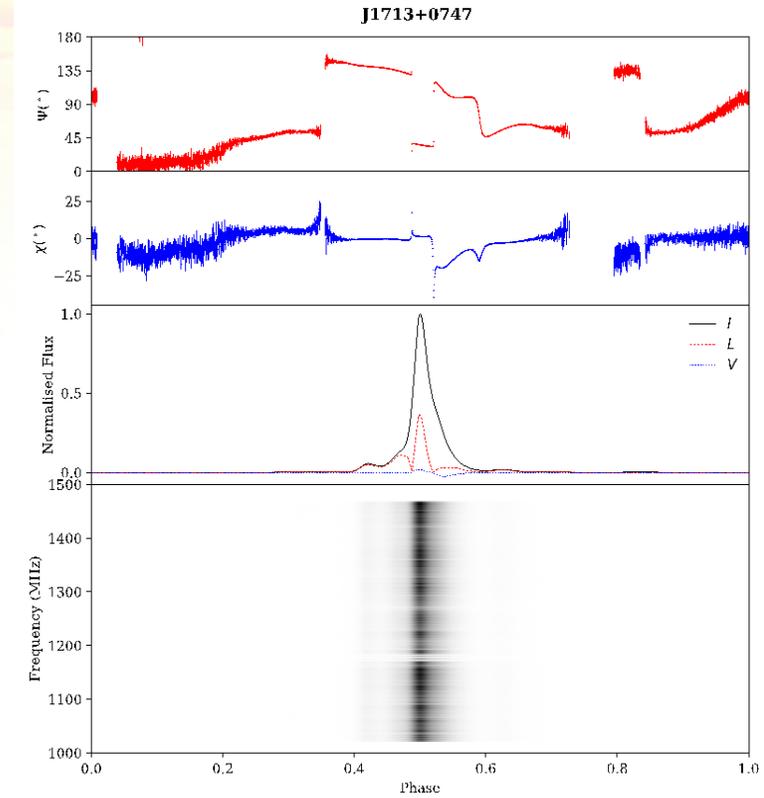
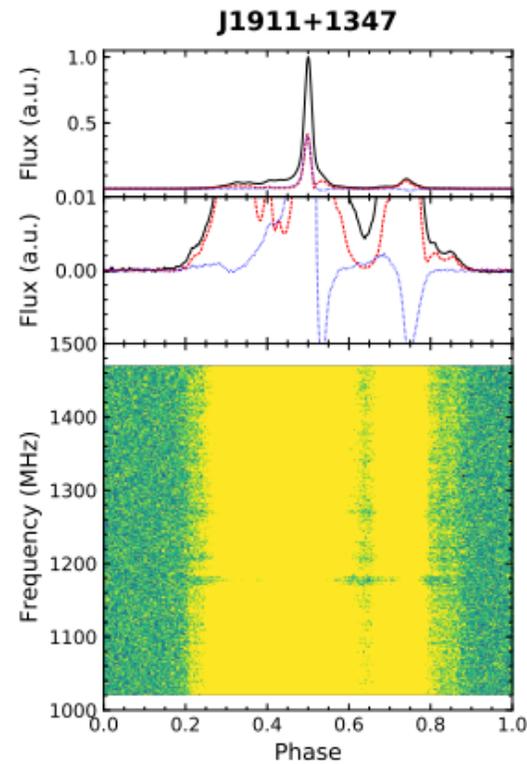
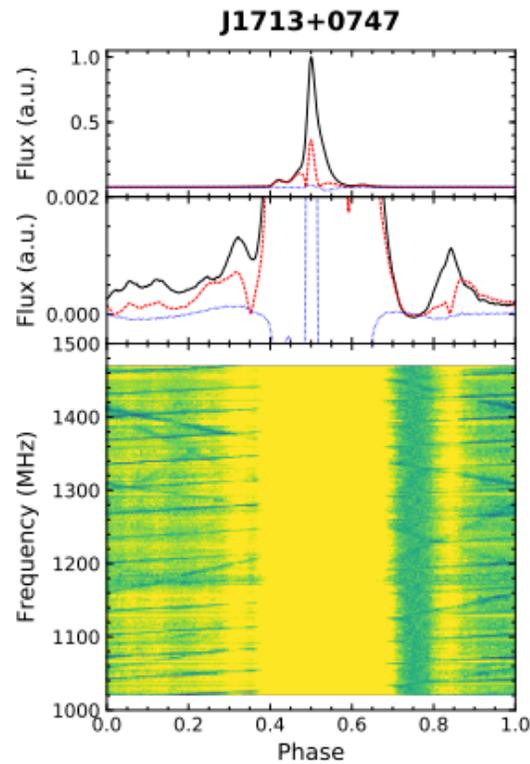
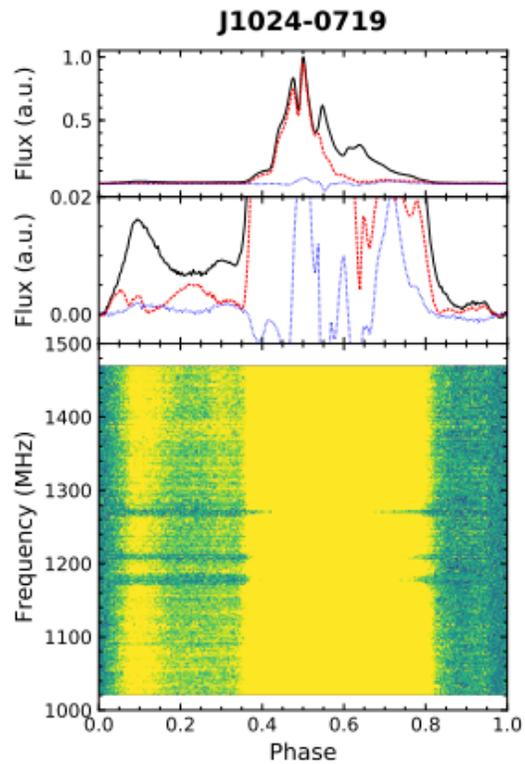


高精度偏振测量

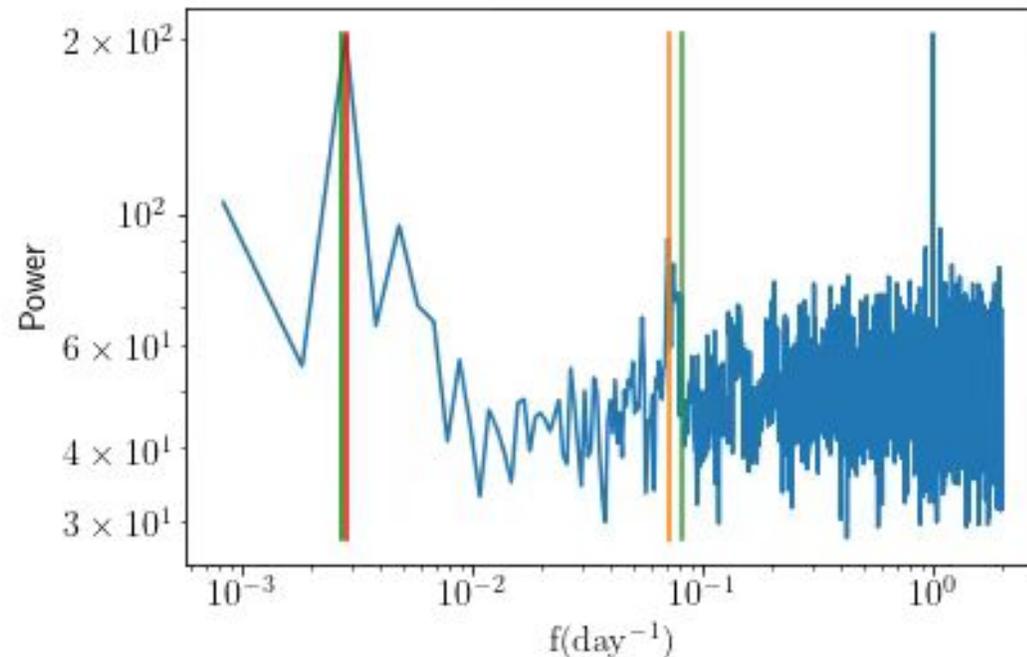
系统地获得了57颗毫秒脉冲星的偏振测量。信噪比>5000
 偏振系统差优于0.5% (Luo et al., Nature)
 发现现有地球电离层偏振校准存在法拉第旋转量系统差 ($\sim 1 \text{ rad/m}^2$ 水平)



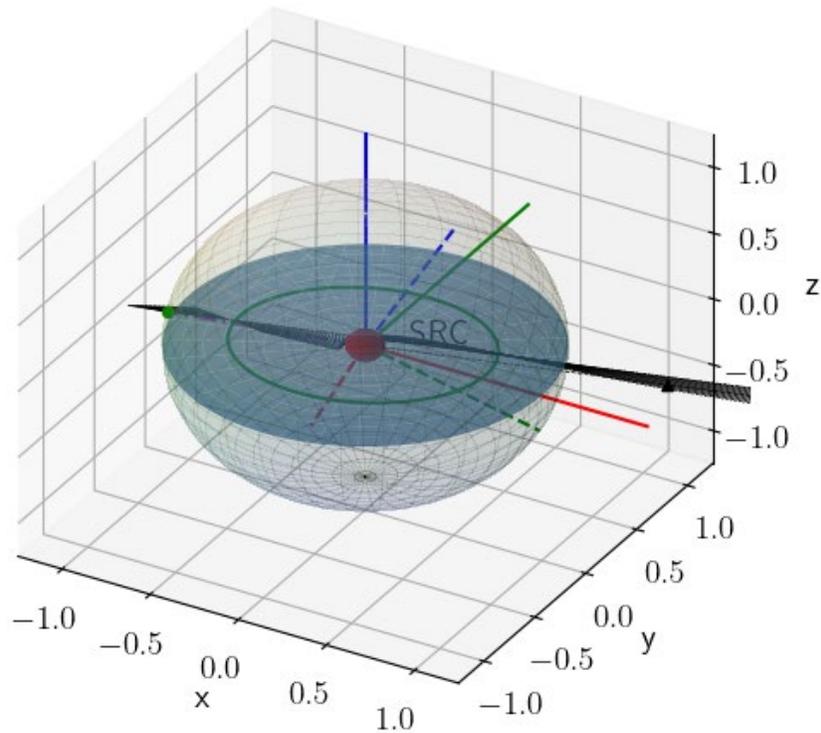
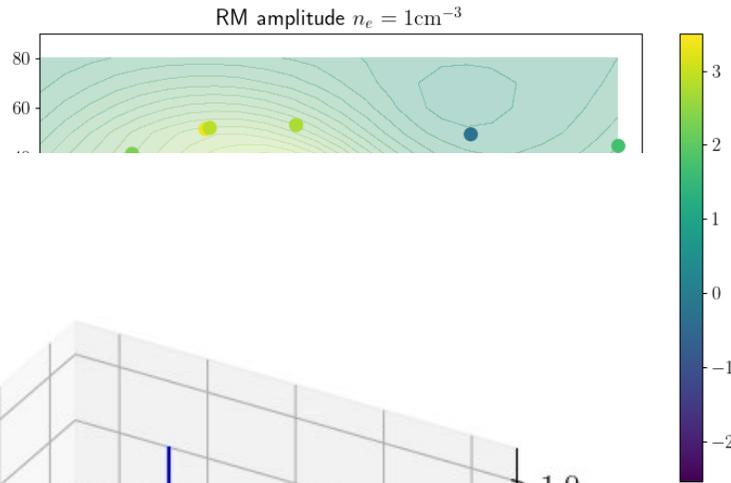
The pulsar radiation beam is probably not a beam



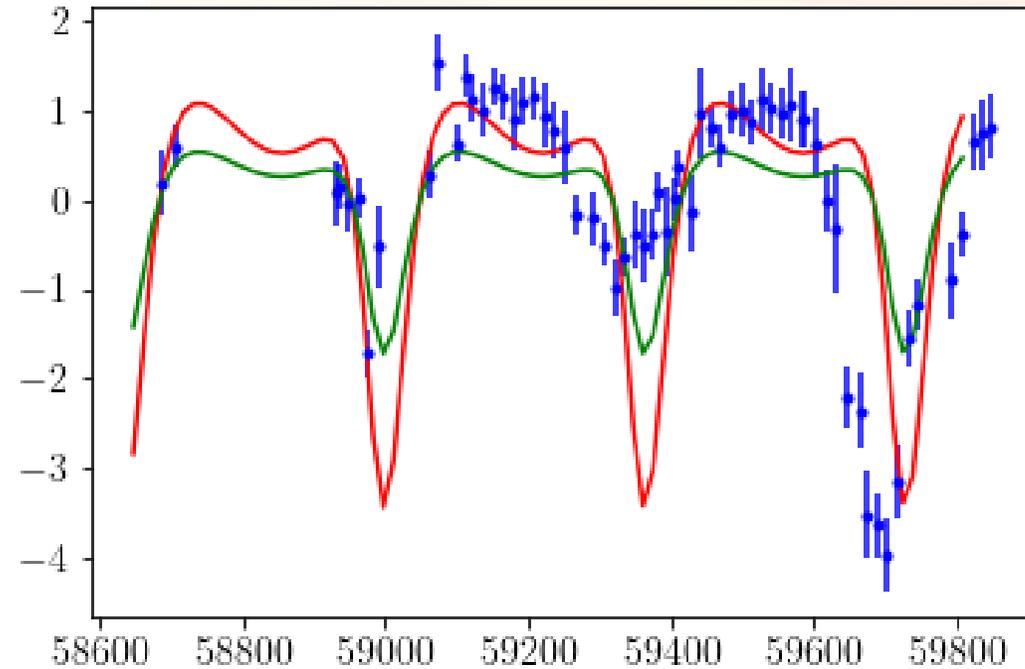
- Standard software IonFR **over estimates** the RM variation by a factor of 2-3 for high dec sources.
- We implement the **IONOF**, it produces nearly the same answers compared to IonFR
- **TEC is problematic**, different TEC model differs by more than factor of 2.
- We **saw 1-year and 28/2-days RM variation**. Indication solar wind –earth magnetosphere interaction is important for sub 1 Rad/m² RM precision



Solar system RM modeling



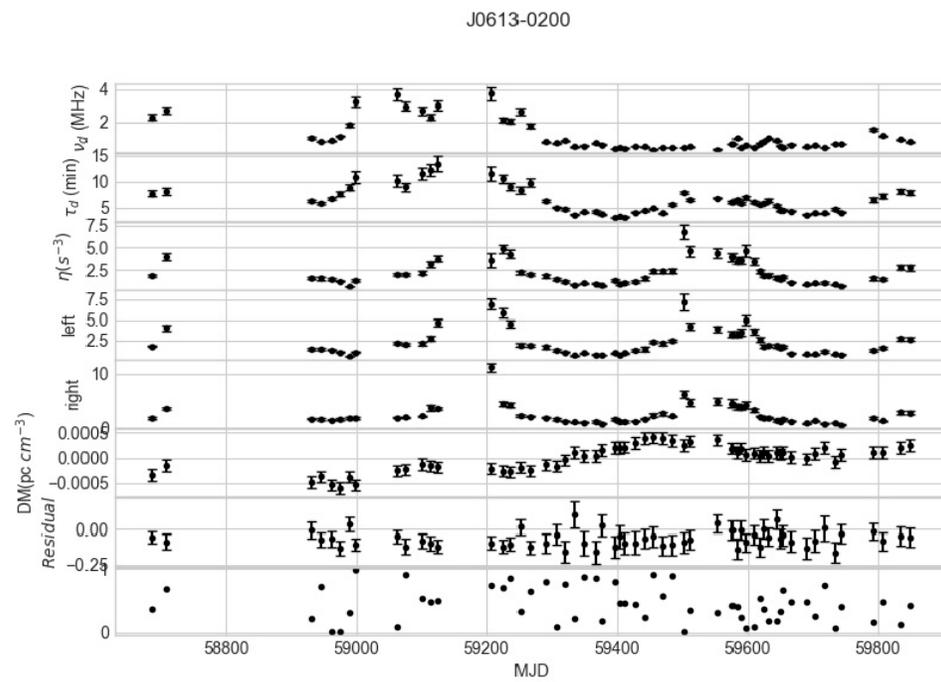
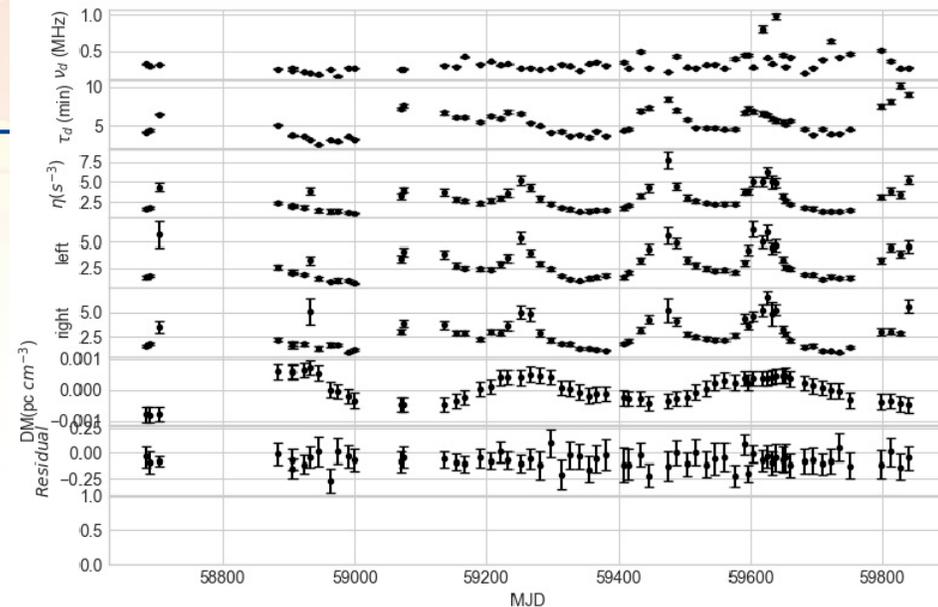
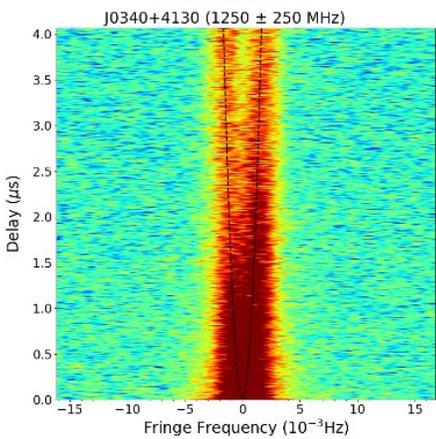
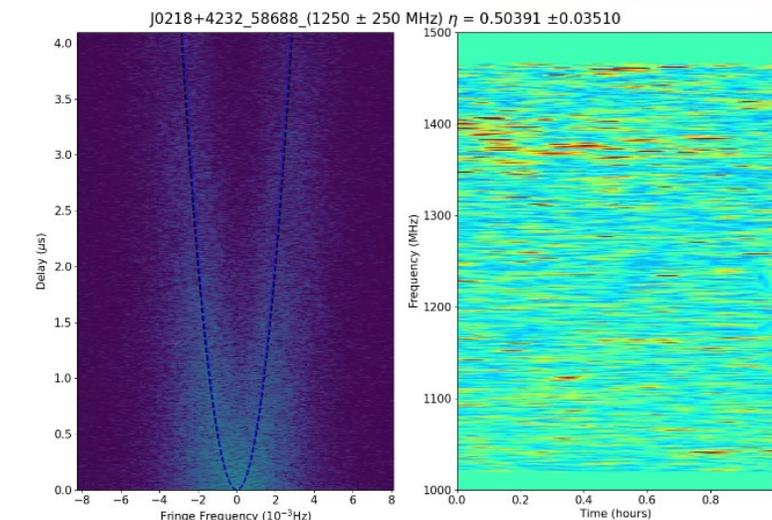
J0636+5129



The naïve model can fit observation. However, one artificially require 100-1000 times higher electron density in solar wind. It seems that we need consider the solar-wind-earth magnetosphere interaction.

Scintillation

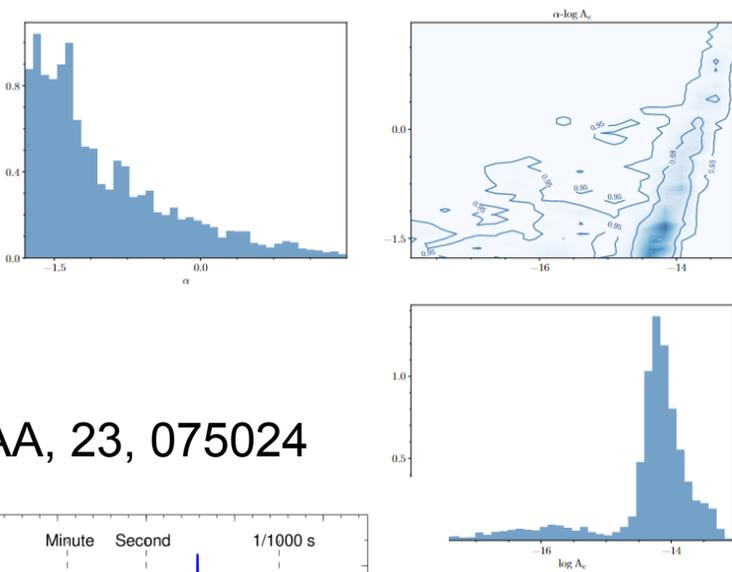
- For a sub fraction of pulsars, we detect clear variation in scintillation effects including 2nd spectra arc curvature.
- Systematic study of ISM turbulence



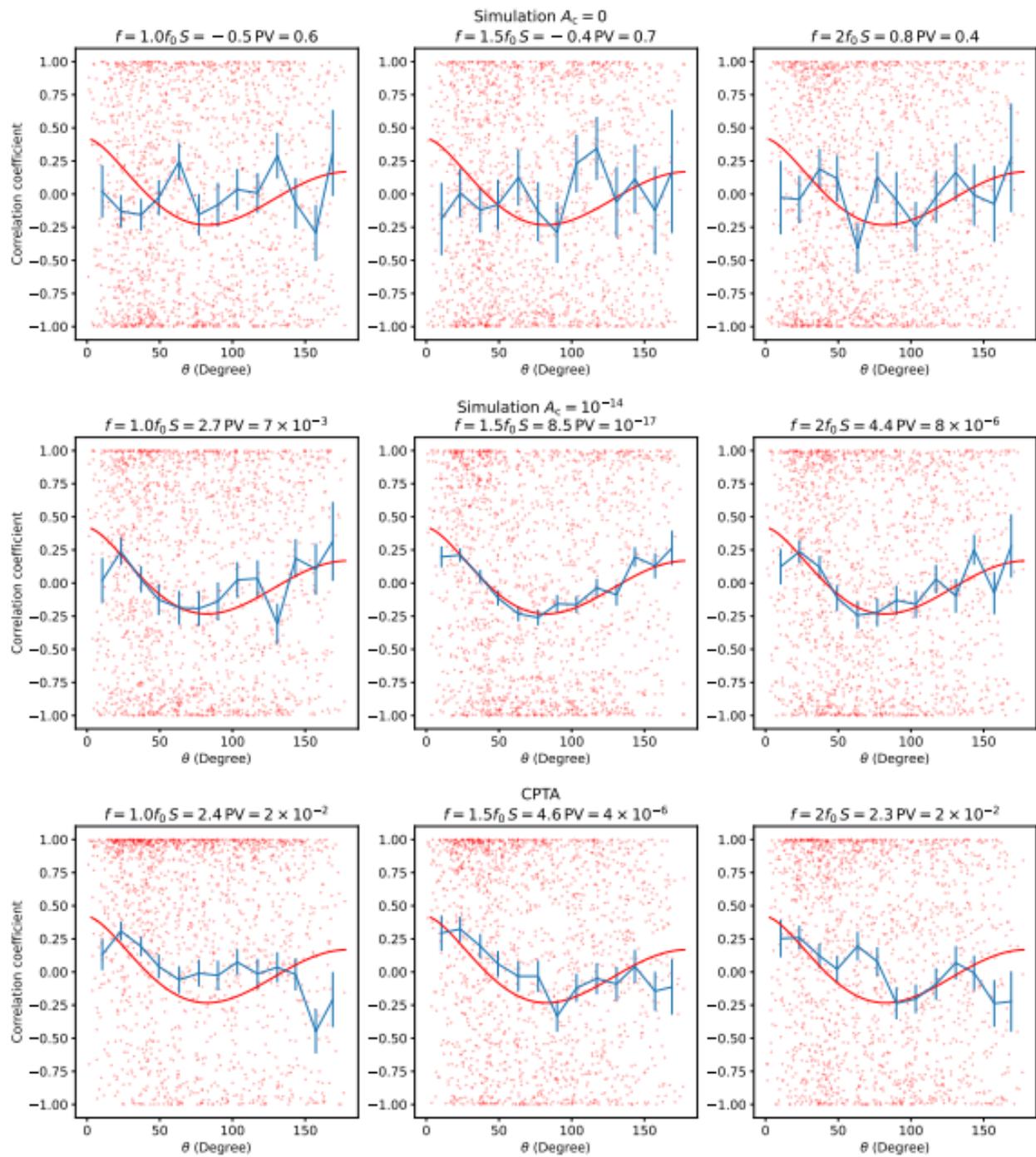
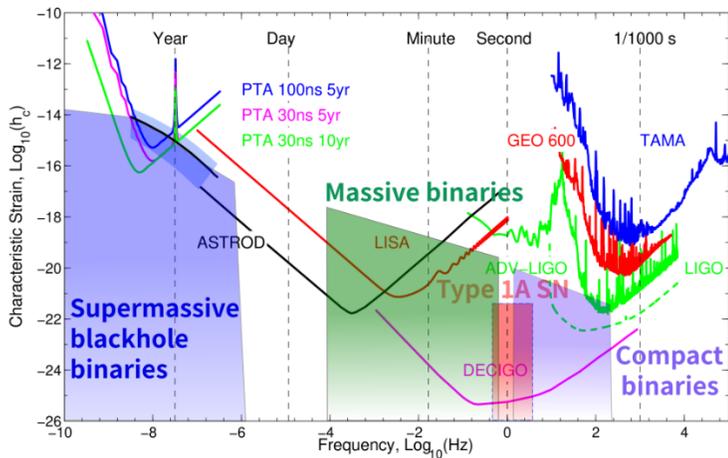


引力波数据分析

- 优化数据处理流程，理解数据系统差和统计问题
- 针对CPTA数据开展优化和分析，发现引力波存在的关键证据(4.6sigma)。

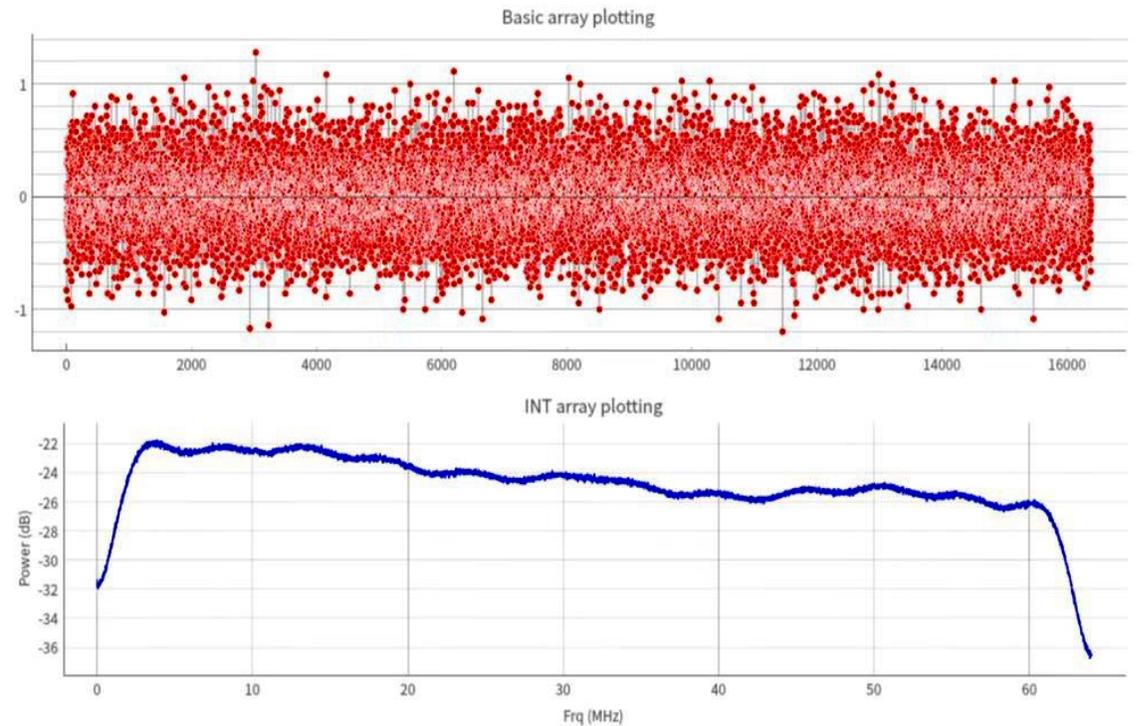
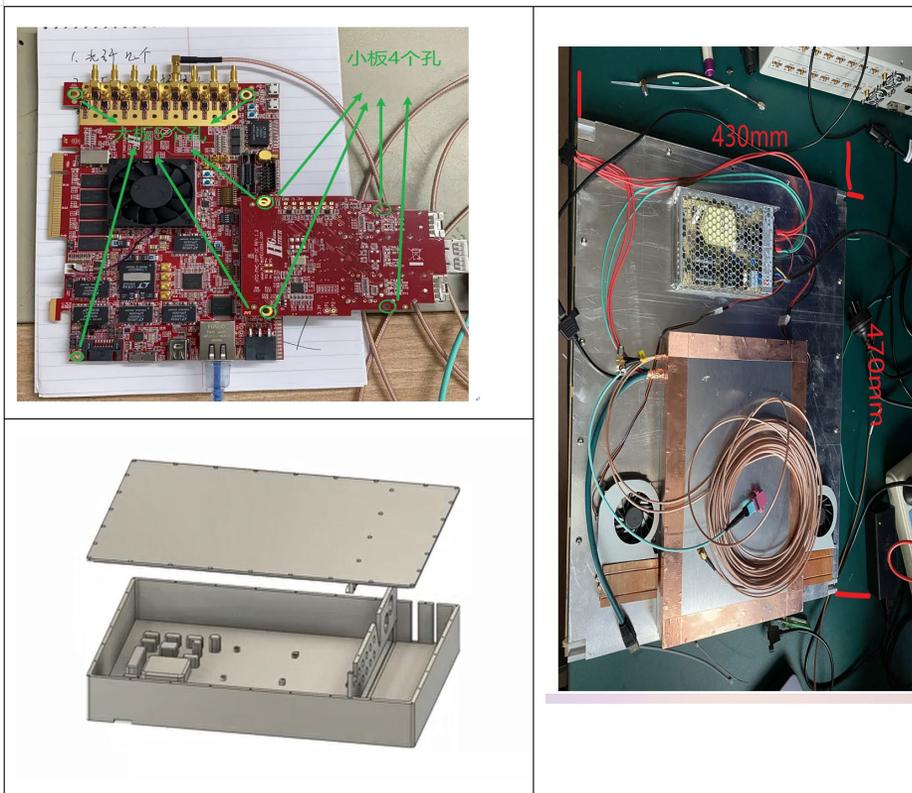


Xu, et al. 2023, RAA, 23, 075024



脉冲星VLBI宽带采集系统

- ◆ 国内VLBI观测数据采集系统存在一定瓶颈，绝大多数都在 500 MHz以下带宽开展；
- ◆ 为满足有关数据采集需要，我们计划研制具有 2 GHz 带宽的双极化通道 VLBI 数字采集终端系统；
- ◆ 成功完成开发32个有效通道的多相滤波器组，每个通道为64MHz的基带信号，国际标准VDIF格式的数据帧，通过40Gb网络以UDP形式发送给高速存储单元。





脉冲星VLBI观测数据高速存储系统

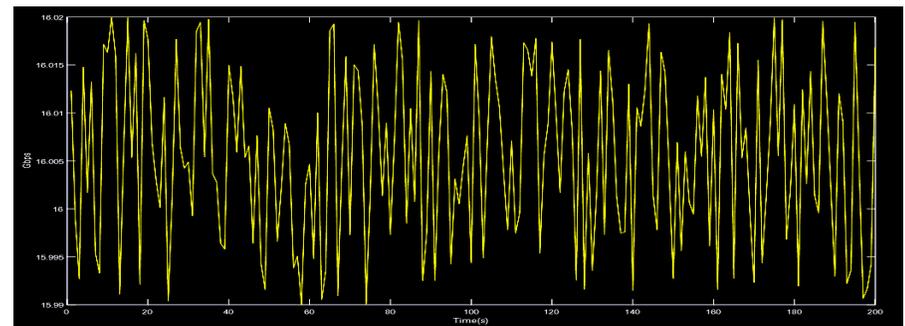
- 宽带 VLBI 观测自然会产生更高速数据流；
- 为满足脉冲星VLBI观测数据高速记录的需要，计划研制一套基于商用产品的超高速数据记录的系统；
- 该系统将更加灵活和易于维护，而且可以摆脱对国外Mark系列系统的依赖；
- 已经研制了**脉冲星VLBI观测高速记录系统样机**，具有 8Gbps 稳定记录能力，初步达到16 Gbps，后续将进一步优化其性能。



```
05:11:22/mk5=set_disks=/mnt/disks/1/*/data
05:11:22/mk5=!set_disks= 0 : 8 ;
05:11:29/mk5=set_disks?
05:11:29/mk5=!set_disks? 0 : 8 : /mnt/disks/1/0/data : /mnt/disks/1/1/data : /mnt/disks/1/2/data : /mnt/disks/1/3/data : /mnt/disks/1/4/data : /mnt/disks/1/5/data : /mnt/disks/1/6/data : /mnt/disks/1/7/data ;
05:12:04/mk5=record-on:testflex8to1
05:12:04/mk5=!record= 0 ;
05:12:22/mk5=ststat?
05:12:22/mk5!/tstat? 1 : Retry - we're initialized now : vbsrecord ;
05:12:23/mk5=ststat?
05:12:23/mk5!/tstat? 0 : 0.91s : vbsrecord : UdpsNorRead 8.23311Gbps : F 0.0% ;
05:12:24/mk5=ststat?
05:12:24/mk5!/tstat? 0 : 1.09s : vbsrecord : UdpsNorRead 8.23275Gbps : F 0.0% ;
05:12:25/mk5=ststat?
05:12:25/mk5!/tstat? 0 : 1.01s : vbsrecord : UdpsNorRead 8.23324Gbps : F 0.0% ;
05:12:30/mk5=evlbi?
05:12:30/mk5!/evlbi? 0 : total : 3344576 : loss : 0 ( 0.00%) : out-of-order : 0 ( 0.00%) : extent : 0seqnr/pkt ;
05:12:32/mk5=evlbi?
05:12:32/mk5!/evlbi? 0 : total : 3512854 : loss : 0 ( 0.00%) : out-of-order : 0 ( 0.00%) : extent : 0seqnr/pkt ;
05:12:44/mk5=record-off
05:12:44/mk5=!record= 1 ;
05:12:50/mk5=scan_check?
05:12:50/mk5!/scan_check? 0 : ? : testflex8to1 : VDIF : 128 : 2022y294d05h12m04.5676s : 39.8167s : 64Mbps : -803
2 : 8032 ;

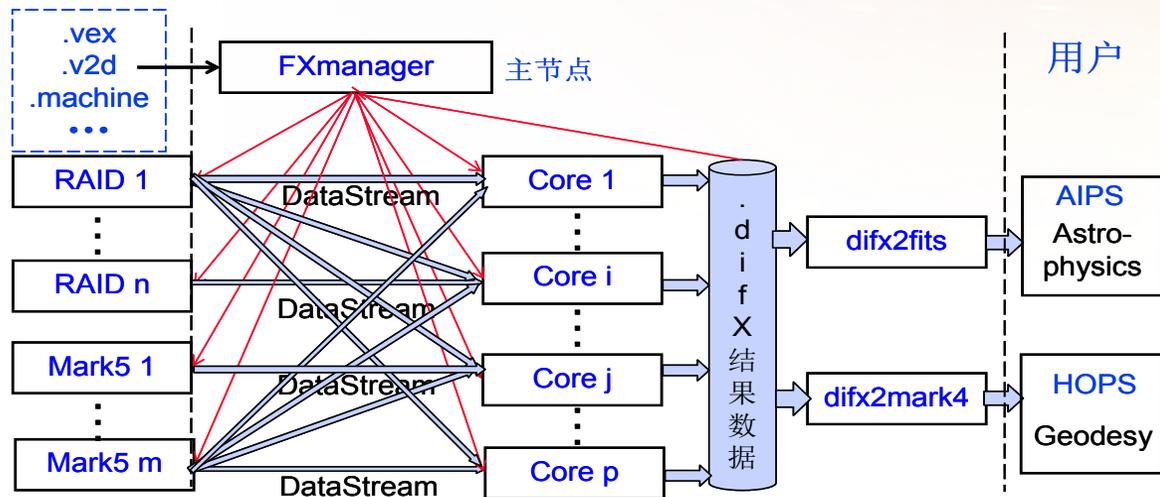
```

图 5: 8Gbps 观测记录实测情况图。



16 Gbps实验室测试图

脉冲星VLBI互相关处理机的原型样机搭建



互相关处理机系统运行框图



脉冲星VLBI互相关处理实验系统硬件单元（红色框图内）

- 相关处理机：各分立射电望远镜采集的射电源信号真正实现“相干”并格式化输出的重要设备，相关处理的效果直接影响科学结果；
- 原型样机搭建：基于原有平台配置了约200TB存储和一个多核管理计算节点，他们之间通过高速网络连接，基本满足数据测试和脉冲星相关功能开发用，具有消色散和脉冲门模块；
- 利用该样机成功对CVN脉冲星测试数据进行相关处理。

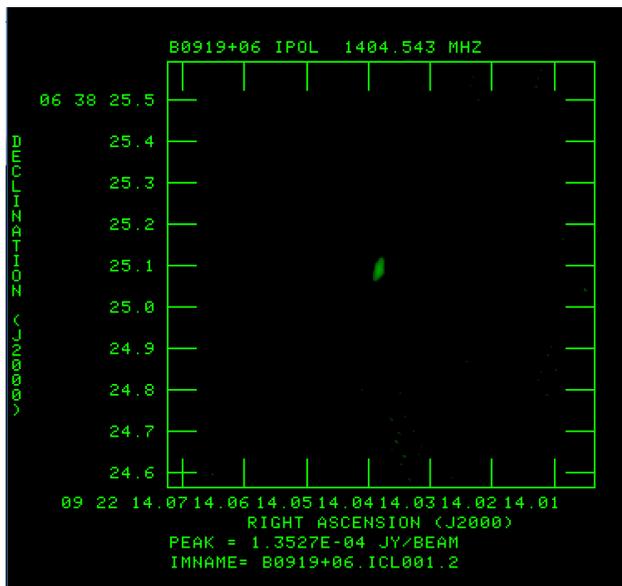
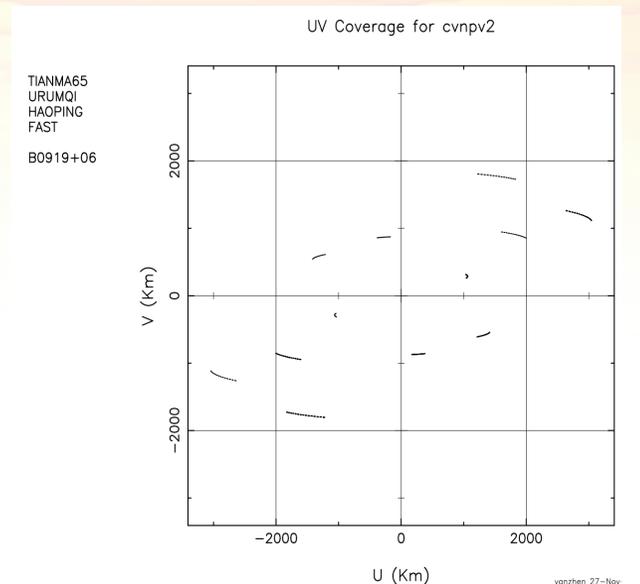
实验代码	f09111
参加台站	500米口径球面射电望远镜（FAST），天马站，南山站
观测目标	脉冲星B1133+16
观测时长	1小时
观测频率和通道设置	1416-1448MHz，分成4个8MHz和双极化记录
数据记录格式	Mark5B
数据传输	存盘和事后处理



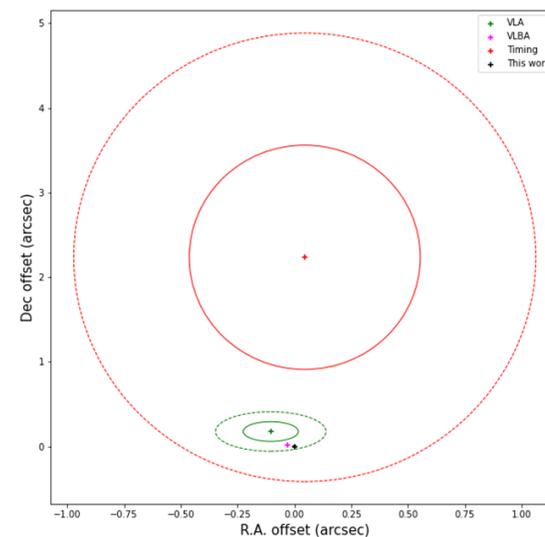
CVN脉冲星观测具体实践

#	NAME	RAJ (hms)	DECJ (dms)	PMRA (mas/yr)	PMDEC (mas/yr)	POSEPOCH (MJD)	S1400 (mJy)
1	B0919+06	09:22:14.0	+06:38:23.3	18.800	86.400	48227.00	10.00

- ❑ 参加观测天线：FAST-500m；天马65米，南山26米、昊平40米
- ❑ 观测波段：L-band
- ❑ 观测时间：11 Apr 2023
- ❑ 积分时间：2 hr



RA = 09:22:14.0310 \pm 0.0002;
DEC = 06:38:24.932 \pm 0.005,



绿色：VLA；
紫红色：VLBA；
红色：Nanshan
telescope
(Timing).



基于脉冲星各参考架高精度链接

- VLBI方法得到的脉冲星位置是在国际天球参考架（ICRF）中描述的；
- 计时观测在太阳系动力学参考架中描述其位置；
- GAIA卫星观测：测定脉冲星伴星位置确定其天体测量参数，在光学参考架中描述的；
- 我们尽可能收集了基于脉冲星实测数据，建立了太阳系行星历表、ICRF和光学参考架的链接，其精度优于1mas。
- 表格6展示了ICRF和DE436行星历表在儒略日55000.0的方向链接参数，其中A= (Ax, Ay, Az) 分别是关于X, Y, Z轴的欧拉旋转角。

$$\vec{k}_{DE} = (I + A + \dot{A}\Delta t)\vec{k}_{ICRF}$$

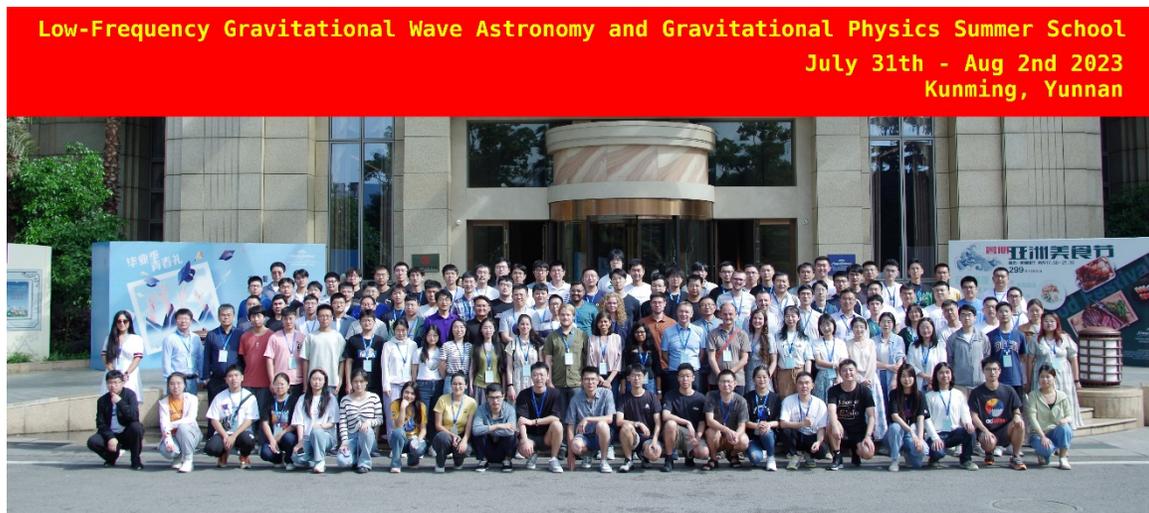
Ephemeris	A_x (mas)	σ_{A_x} (mas)	A_y (mas)	σ_{A_y} (mas/yr)	A_z (mas/yr)	σ_{A_z} (mas/yr)	dis in RA. (mas)	dis in DEC. (mas)
DE436 all	1.31	0.48	-0.01	0.49	-0.32	0.38		
J0218+4232	1.65	0.53	0.84	0.59	-0.93	0.43	-2.07	-1.74
J0437-4715	1.03	0.54	-0.64	0.58	-0.58	0.42	-1.94	0.20
J1713+0747	0.96	0.54	0.09	0.51	0.34	0.42	3.19	0.96
J1939+2134	1.95	0.51	-0.17	0.50	-0.32	0.41	-0.37	-1.71
J2010-1323	1.63	0.50	-0.17	0.51	-0.04	0.42	-0.35	1.51
J2145-0750	1.42	0.48	-1.23	0.53	0.70	0.42	4.58	-3.17
J2317+1439	1.49	0.47	0.06	0.56	-0.37	0.41	-0.12	1.56

表格 6: ICRF 和 DE436 在儒略日 55000.0 的方向连接参数。

国内国际合作

- 举办SKA脉冲星科学专题研讨会 --- 200+ 人
- 举办中德合作低频引力波研讨会 --- 40+ 人
- 举办国际中低频引力波暑期学校 --- 100+ 人

- 繁荣SKA科学研究团队
- 繁荣射电天文文化
- 繁荣国内外科学交流



脉冲星探测引力波是SKA脉冲星方向关键科学目标。我们和欧洲多国开展了深入合作。2021年-2023年，相关工作共8篇。

为SKA时代进一步深入合作提供了基础。

- 1 2023arXiv230616227A 2023/06 cited: 71   
The second data release from the European Pulsar Timing Array: V. Implications for massive black holes, dark matter and the early Universe
Antoniadis, J.; Arumugam, P.; Arumugam, S. *and 111 more*
- 2 2023arXiv230616226A 2023/06 cited: 20   
The second data release from the European Pulsar Timing Array IV. Search for continuous gravitational wave signals
Antoniadis, J.; Arumugam, P.; Arumugam, S. *and 97 more*
- 3 2023arXiv230616225A 2023/06 cited: 10   
The second data release from the European Pulsar Timing Array II. Customised pulsar noise models for spatially correlated gravitational waves
Antoniadis, J.; Arumugam, P.; Arumugam, S. *and 95 more*
- 4 2023arXiv230616224A 2023/06 cited: 38   
The second data release from the European Pulsar Timing Array I. The dataset and timing analysis
Antoniadis, J.; Babak, S.; Bak Nielsen, A. -S. *and 66 more*
- 5 2023arXiv230616214A 2023/06 cited: 134   
The second data release from the European Pulsar Timing Array III. Search for gravitational wave signals
Antoniadis, J.; Arumugam, P.; Arumugam, S. *and 95 more*
- 6 2023arXiv230612234Q 2023/06 cited: 8   
Practical approaches to analyzing PTA data: Cosmic strings with six pulsars
Quelquejay Leclere, Hippolyte; Auclair, Pierre; Babak, Stanislav *and 69 more*
- 7 2022MNRAS.509.5538C 2022/02 cited: 29   
Noise analysis in the European Pulsar Timing Array data release 2 and its implications on the gravitational-wave background search
Chalumeau, A.; Babak, S.; Petiteau, A. *and 49 more*
- 8 2021MNRAS.508.4970C 2021/12 cited: 205   
Common-red-signal analysis with 24-yr high-precision timing of the European Pulsar Timing Array: inferences in the stochastic gravitational-wave background search
Chen, S.; Caballero, R. N.; Guo, Y. J. *and 49 more*

后续工作考虑和举措

□ 完成SKA-low先导试验阵列，实现SKA-mid阵列观测

- 数字接收机 (已经完成了电路部分)
- 数字波束合成 (完成了部分代码)
- 阵列脉冲星数据处理算法 (尚需要开展)

□ 进一步加强SKA相关国际合作研究

- 广泛宣传、积极组织青年科研人员参加、牵头SKA科学工作组
- 继续加强中-澳、中-南非、中-德的科技合作、学术交流、人才培养

□ 进一步加强人才队伍建设

- 走出去
- 引进来

进展总结

- (1) 完成了我国SKA-low试验阵列的先导技术性探索，自主研发了多项低频脉冲星观测实验所需的部件。
- (2) 依托国内现有设备，探索了百纳秒级精度脉冲星计时的实现方法及脉冲星类天体的搜寻方法。
- (3) 研究了脉冲星计时阵列探测引力波数据分析方法，探测到纳赫兹引力波存在的关键证据。
- (4) 在快速射电暴深度监测等方面取得了较好的成果。
- (5) 在综合脉冲星时建立方法、脉冲星与原子钟联合的纸面时间尺度建立、脉冲星时驾驭原子钟等方面取得研究进展，初步验证了脉冲星时对原子钟的频率驾驭技术。
- (6) 完成了脉冲星VLBI宽带数据采集系统研发，研制了脉冲星VLBI高速记录系统样机和互相关处理原型样机，初步实现了1mas级精度的脉冲星VLBI定位观测。
- (7) 第一标注论文19篇，申请专利7项



中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, CAS

敬请指正！

谢谢！