

基于100G以太网和GPU的 4G采样率实时信号处理系统

任祥祥

山东大学

2022年8月10日

為天下儲人材

為國家圖富強

目录

- 项目背景
- 项目设计方案及测试
- 总结及下一步计划

阿里原初引力波探测计划-Ali iCPT

引力波的波源主要有两大类：

- 2016 年 LIGO宣布首次发现双黑洞并合发射的引力波
- 若探测到原初引力波，将会是“又一个首次”的重大发现
- 宇宙微波背景辐射（简称CMB）的B模式偏振是探测原初引力波的最佳手段

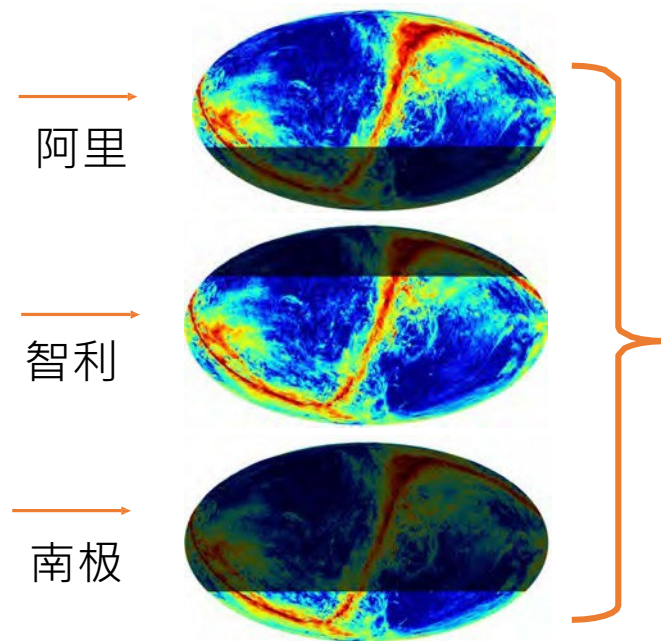
北半球第一个地面CMB偏振观测实验

我国“引力波探测计划”的地面实验部分

北半球天区的 CMB 偏振信号的**首次观测**

北天区对原初引力波的**最精确的测量**

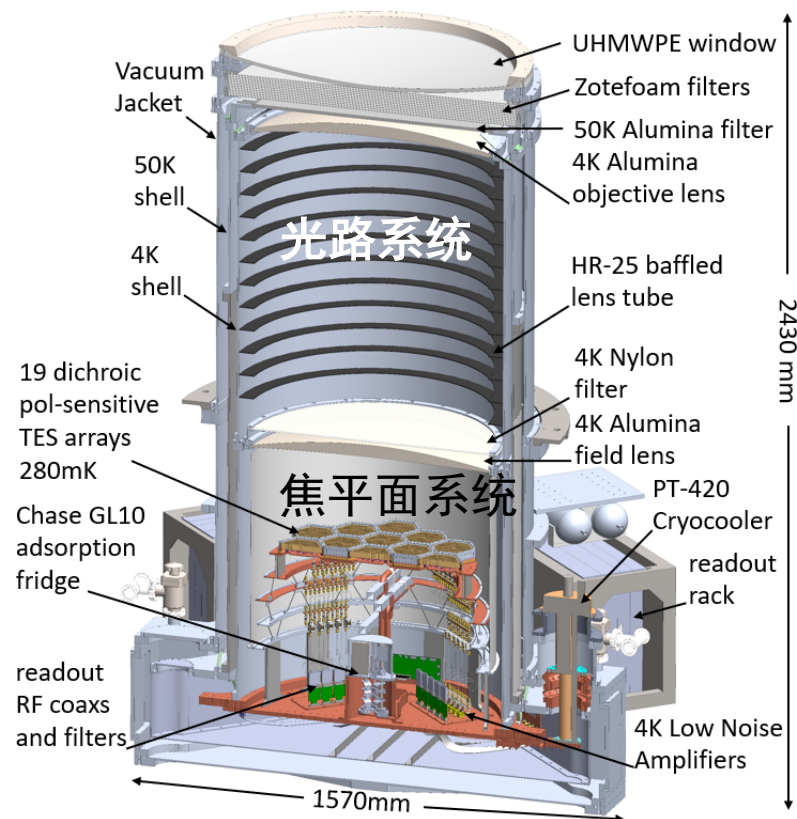
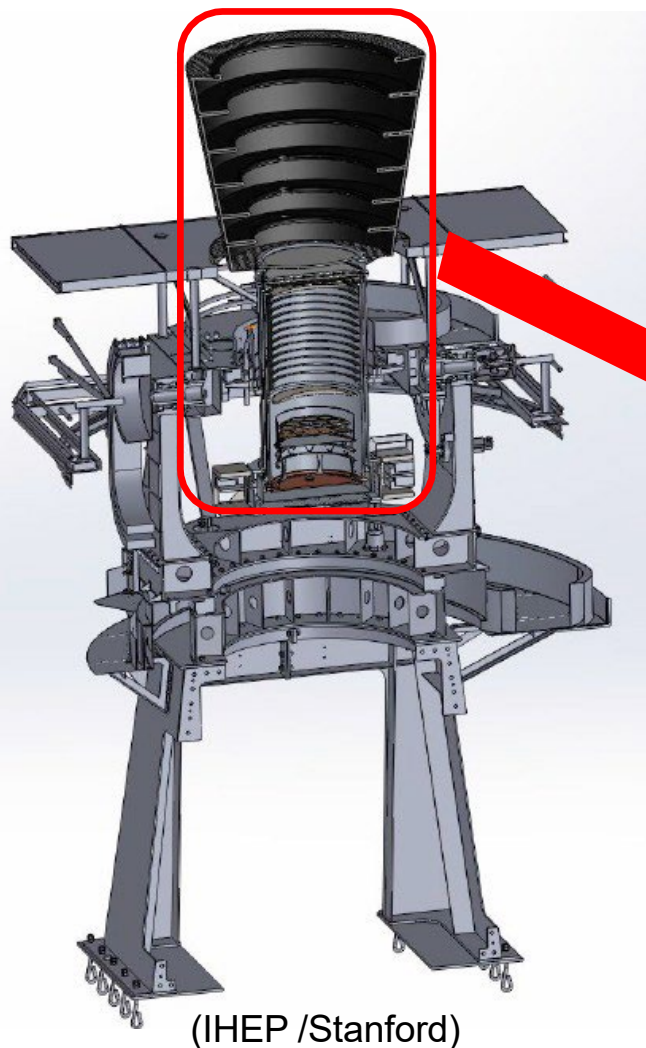
结合南半球BICEP项目，实现对CMB 极化地面观测的**全天覆盖**



AliCPT-1 望远镜

AliCPT-1设计指标**国际一流**:

- 同类实验中口径最大 (BICEP系列)
- 探测器数量最多
- 北半球不可替代



恒温器

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会 2022



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

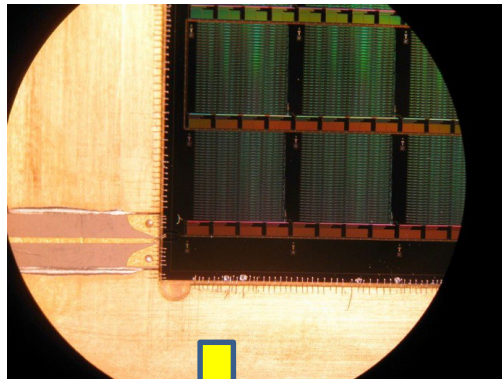
AI iCPT-1 望远镜-室温电子学

国家天文台、高能所、
紫金山天文台、山东
大学合作开发

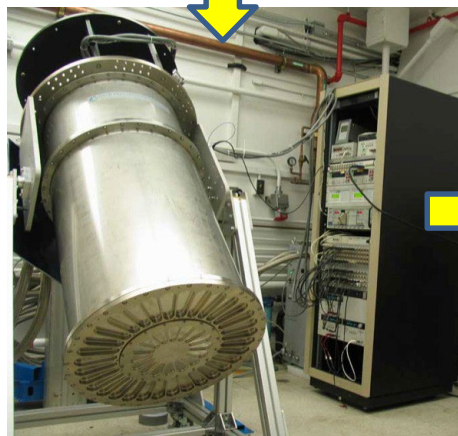
观测宇宙微波
背景

Cosmic
Microwave
Background
(CMB)

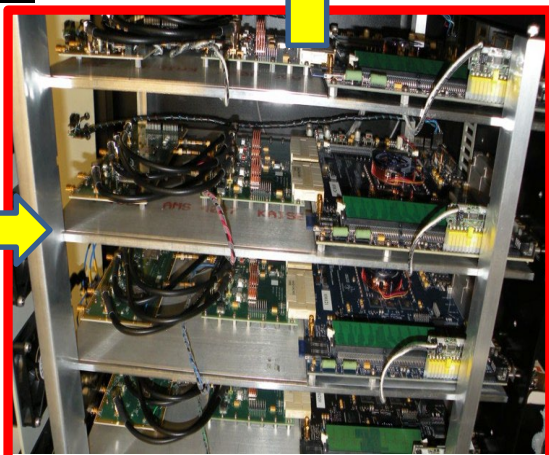
探测器 Detector



CMB 观测



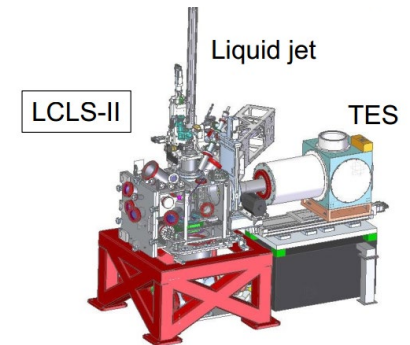
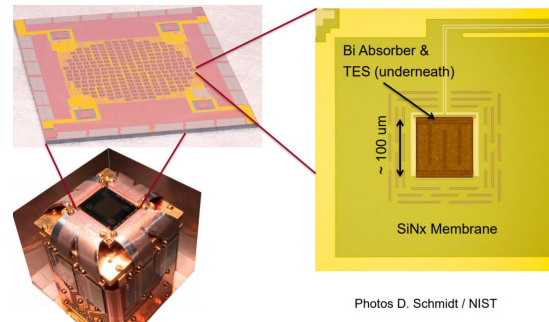
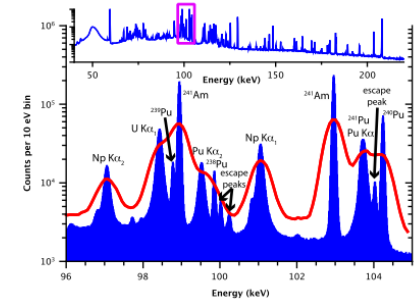
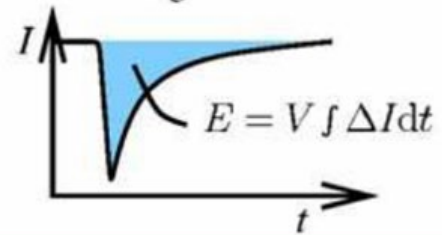
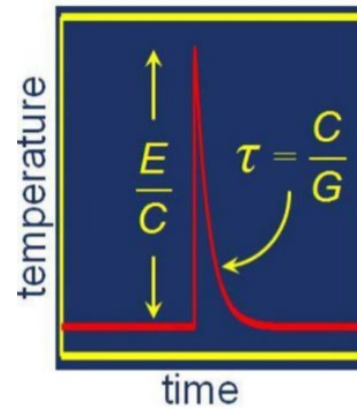
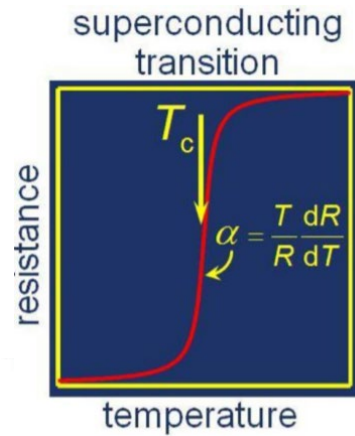
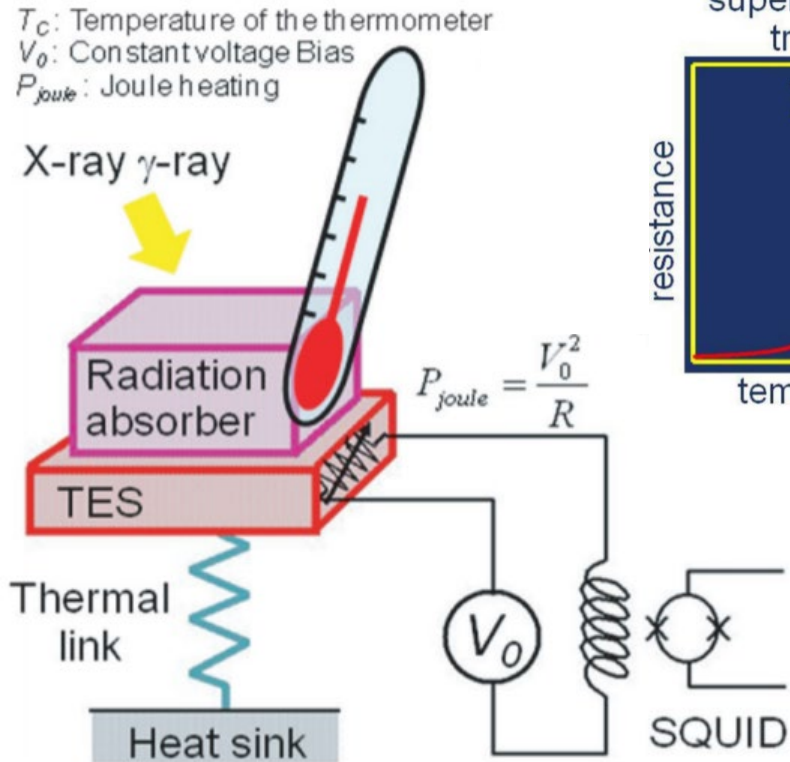
制冷箱 Cryostat



读出系统 Readout

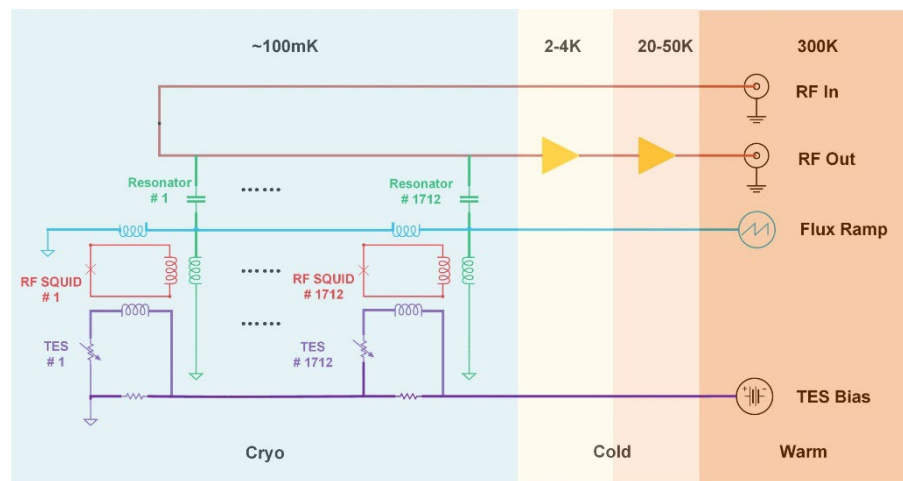
室温读出系统是原初引力波望远镜必须的关键环节和我国自主研发的核心技术

AliCPT-1 望远镜- TES探测器读出原理



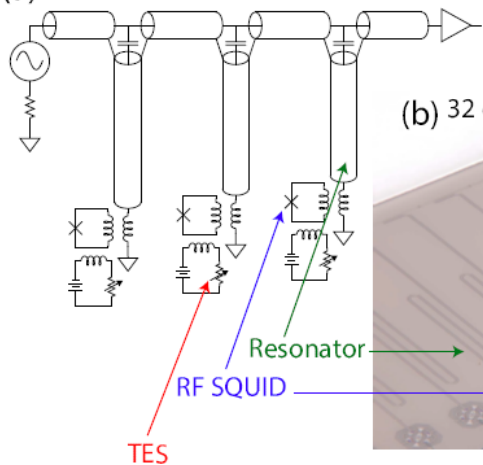
AliCPT-1 望远镜- μmux 探测器读出原理

- 相对于传统的TDM和FDM复用方法可以实现 $>1000:1$ 的复用比。

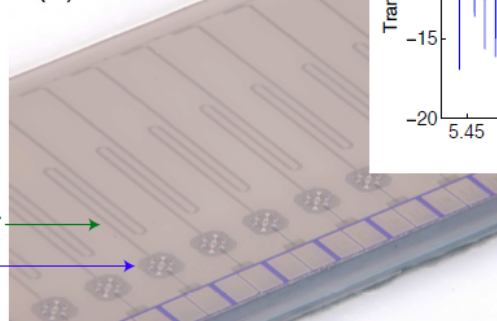


Microwave SQUID MUX

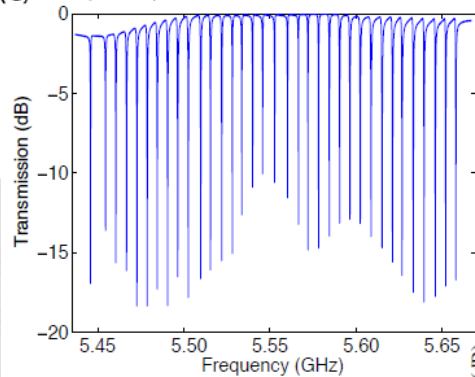
(a) schematic



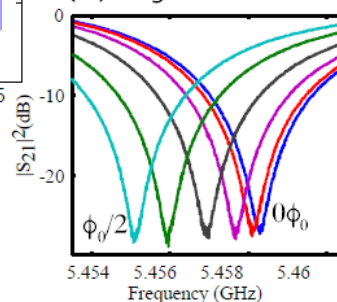
(b) 32 channel multiplexer



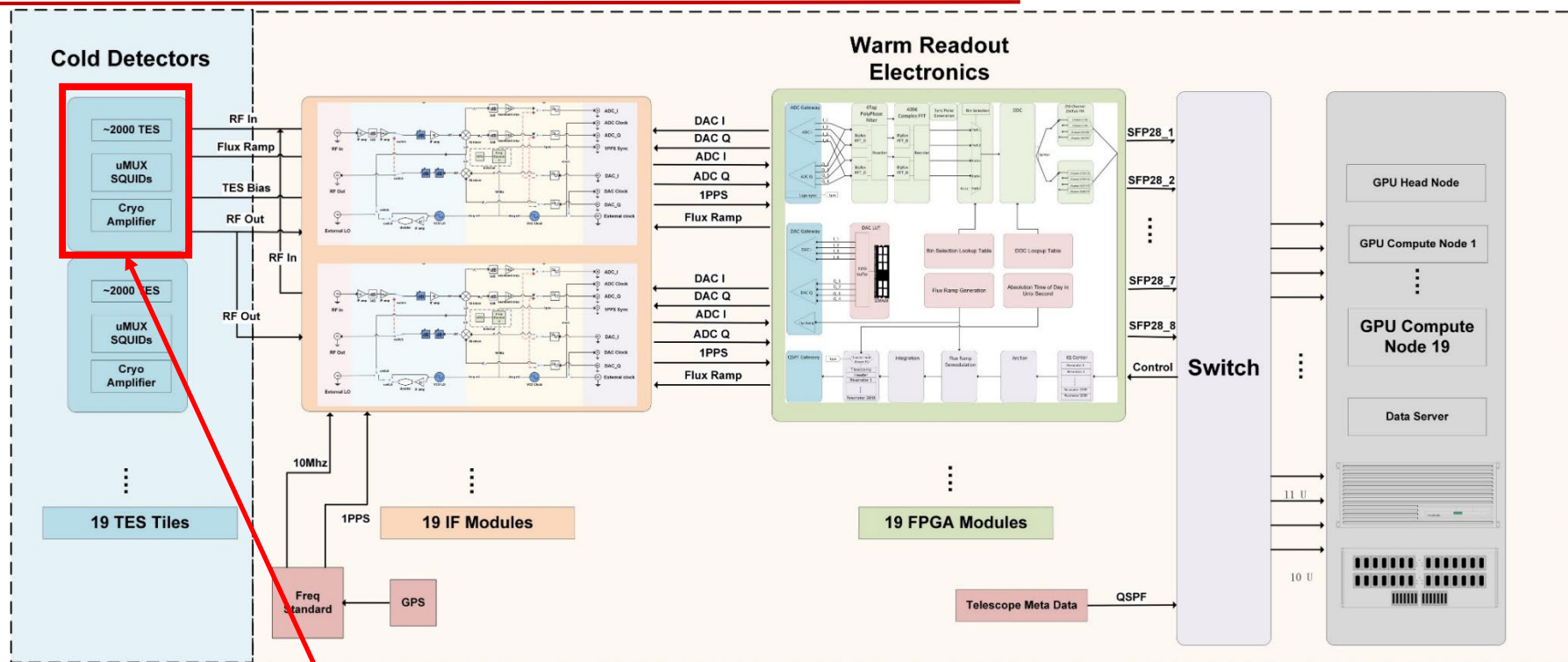
(c) frequency comb



(d) single device vs I



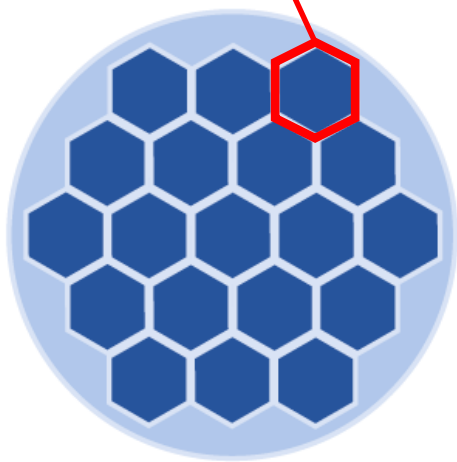
室温电子学设计框架



山东大学承担:

- 中频模拟电路设计
- AD/DA模块设计
- FPGA固件设计
- 控制系统设计

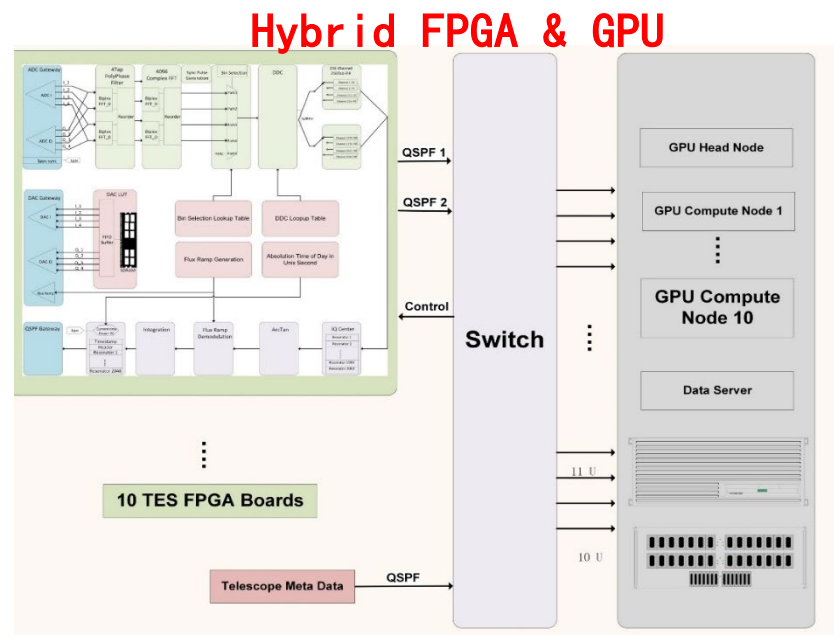
19 Tiles
1712 Detectors per tile



AI iCPT-1 室温电子学: FPGA+GPU方案

随着半导体技术的进步和成本的降低:

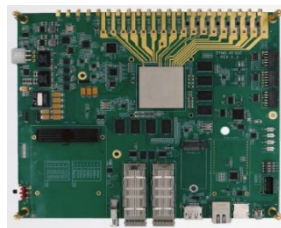
- 执行更复杂算法
- 灵活升级、拓展和搭配
- 成本可控
- 更充分的利用观测时间
- 提升观测精度(更好的时间精度和频率精度的组合)



采样+高性能处理+高速交换和存储



高速模数/数模转换



Zynq RFSoc FPGA



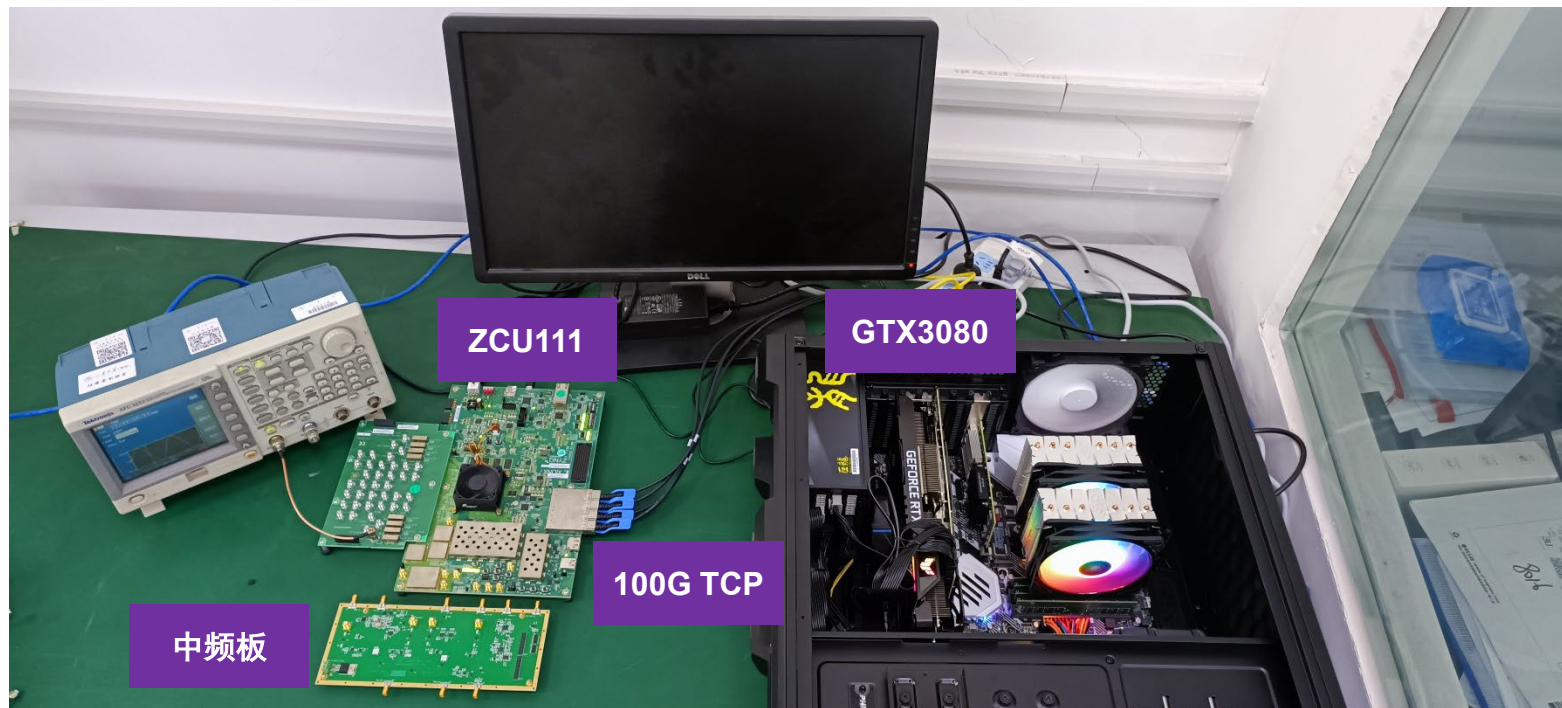
NVIDIA GPU的实时处理
多源异构数据交换和存储



AliCPT-1室温电子学:FPGA+GPU方案

基于ZCU111开发板:

- 实现4G采样ADC和DAC
- 实现100G TCP数据传输
- 结合GTX3080 GPU 实现ADC实时FFT



ZCU111电子学

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会 2022



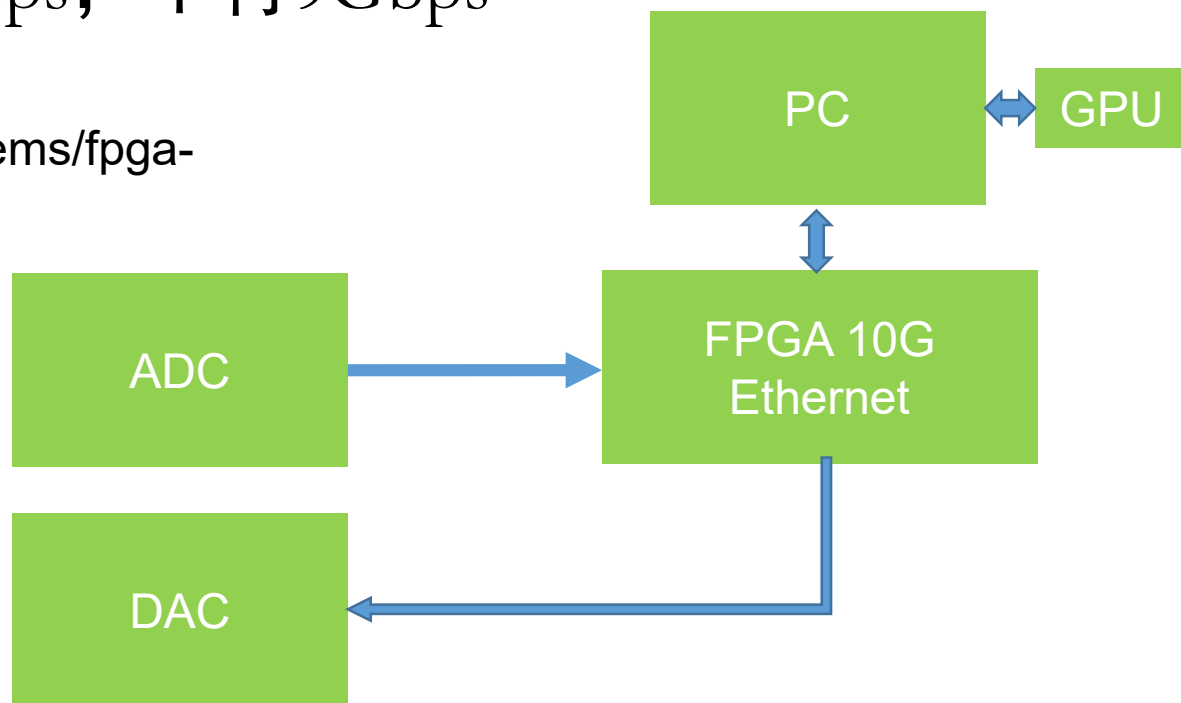
山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

AliCPT-1 室温电子学:10G TCP

- 2通达4GSPS ADC&DAC
- DAC支持 2^{19} 波形存储
- 完成ADC的ENOB测试
- TCP上行速率8Gbps, 下行9Gbps

参考:

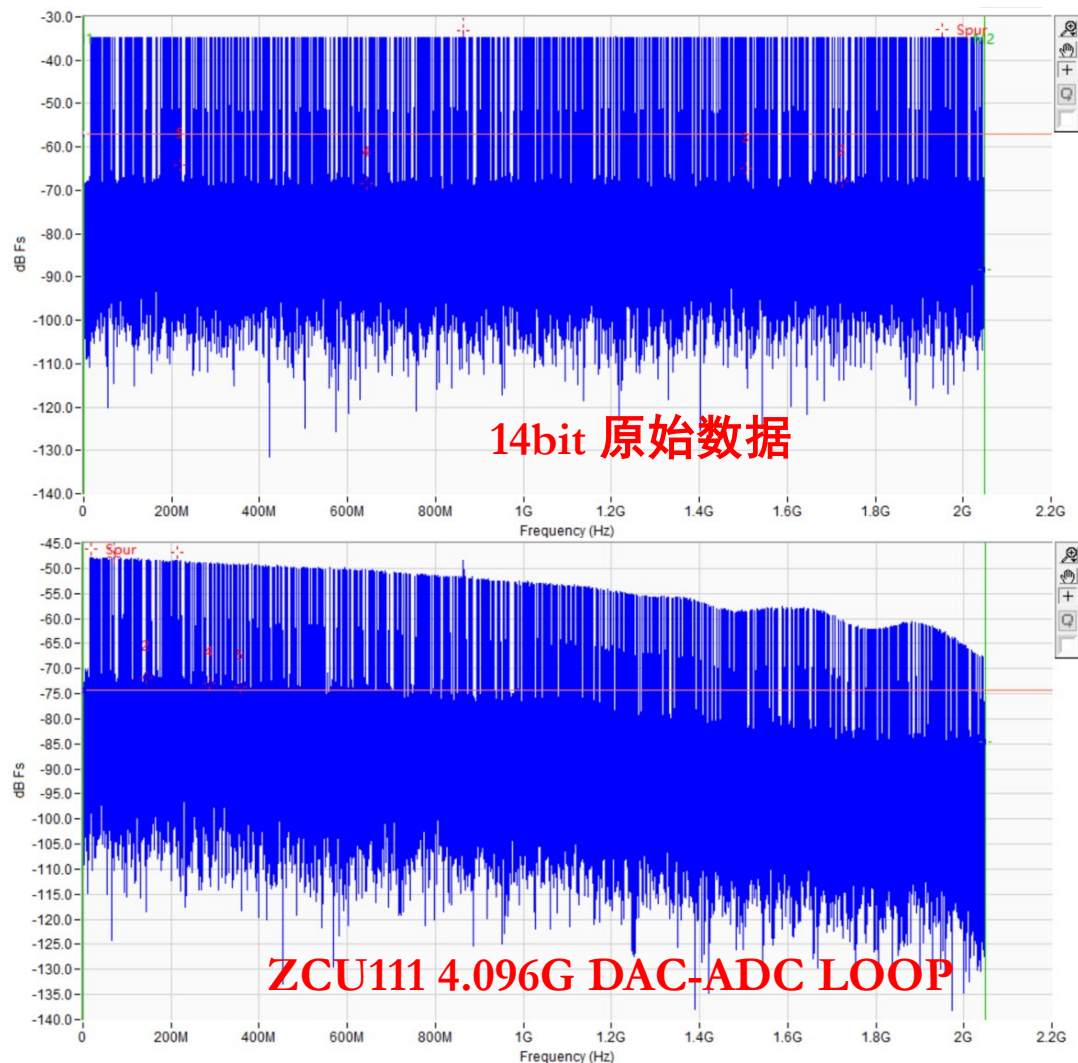
<https://github.com/fpgasystems/fpga-network-stack>



AliCPT-1 室温电子学:10G TCP测试

Frequency (MHZ)	SNR	SFDR	THD	SINAD	ENOB	Fund	NSD/Hz
240	61.33	74.936	74.687	61.15	9.865	-0.777	-154.426
300	61.367	74.269	73.508	61.141	9.864	-1.311	-154.463
600	61.239	73.565	72.313	60.942	9.831	-2.266	-154.335
765	61.324	75.045	75.262	61.163	9.868	-3.127	-154.42
900	61.32	74.894	76.021	61.193	9.873	-3.78	-154.416
1200	60.804	73.623	72.592	60.552	9.766	-3.844	-153.901
1500	60.761	74.011	74.495	60.601	9.774	-5.079	-153.857
1900	57.02	77.389	75.688	56.969	9.171	-9.079	-150.117
2397	32.318	49.22	57.734	32.304	5.074	-8.255	-125.413

AliCPT-1 室温电子学: 10G TCP 测试



- 2^{19} 点原始数据
- 14bit 4.096GSPS DAC
- 12bit 4.096GSPS ADC
- 1024 个频点

AliCPT-1 室温电子学:100G TCP

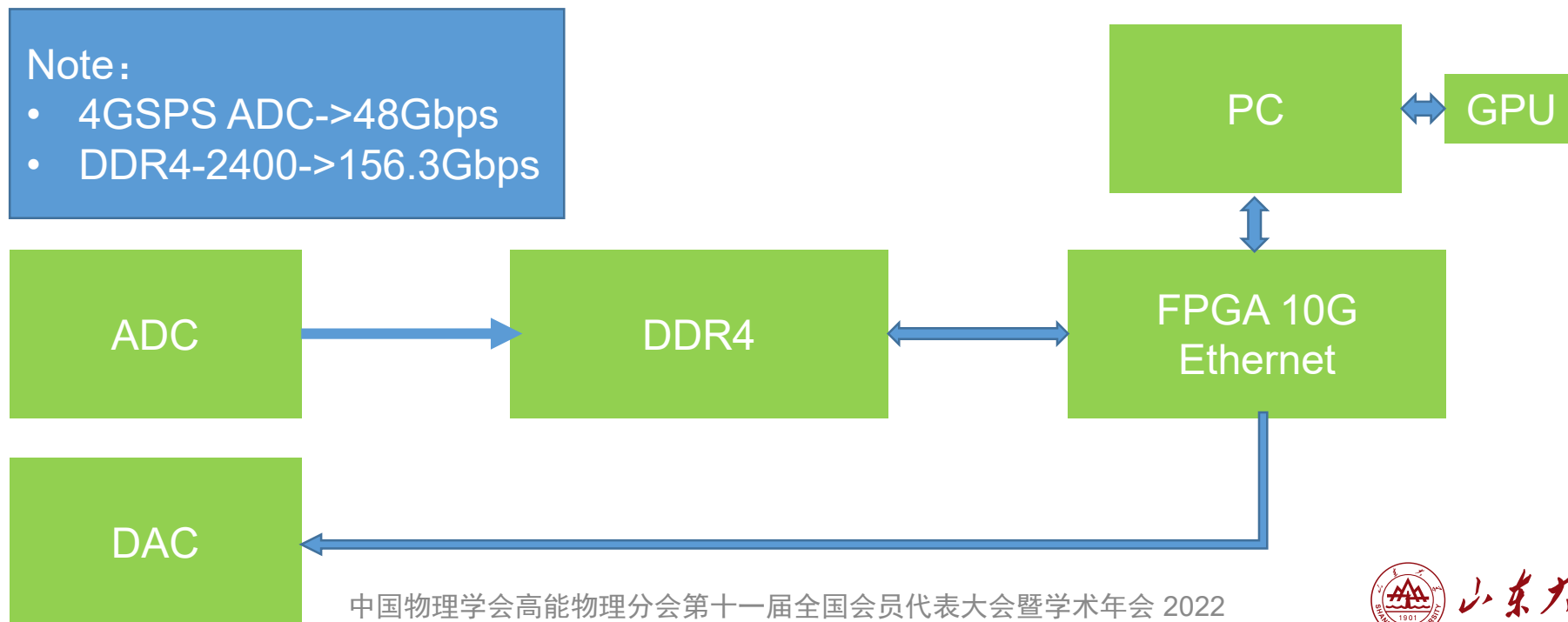
- 4GSPS ADC数据直传PC
- DAC支持 2^{19} 波形存储
- TCP上行速率 $>70\text{Gbps}$
- 实现GPU实时对ADC数据做FFT处理

参考:

<https://github.com/fpgasystems/fpga-network-stack>

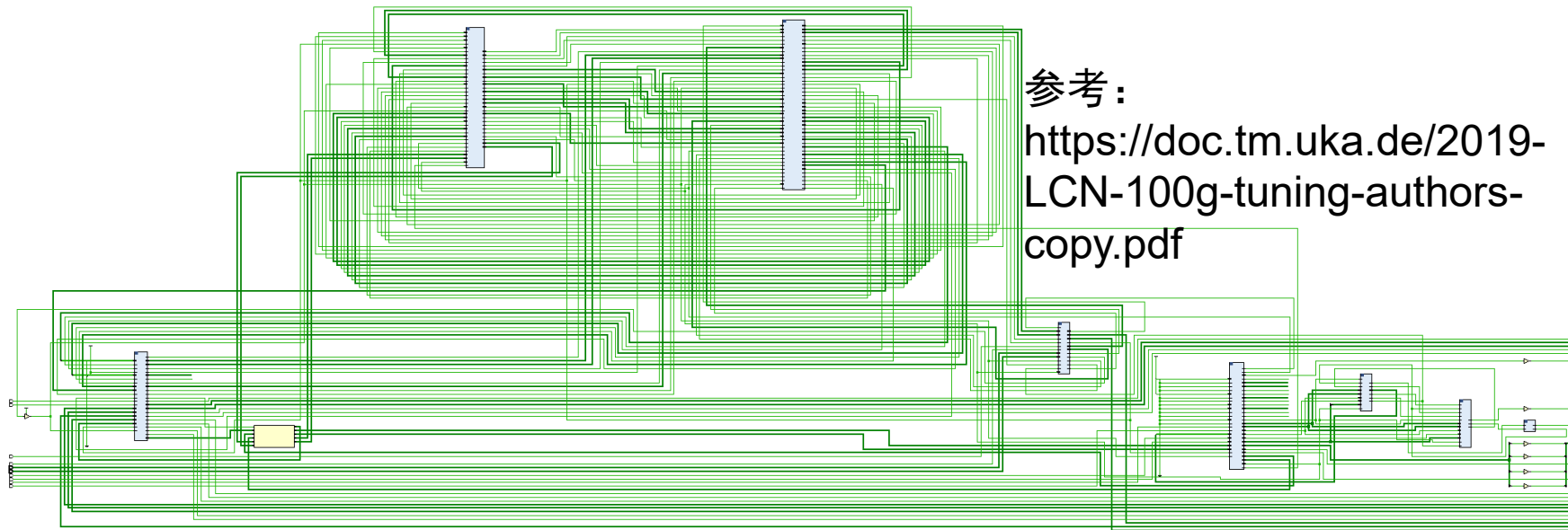
Note:

- 4GSPS ADC $\rightarrow 48\text{Gbps}$
- DDR4-2400 $\rightarrow 156.3\text{Gbps}$



AliCPT-1室温电子学:100G TCP

- 没有数据处理算法, FPGA资源相对充裕
- 100G只用FPGA自带缓存, 会存在一定死时间
- Windows系统下需8~10线程才能满载100G运行
- Linux系统单线程可实现40G带宽
- Linux系统下需做特殊设置才能实现40G/线程



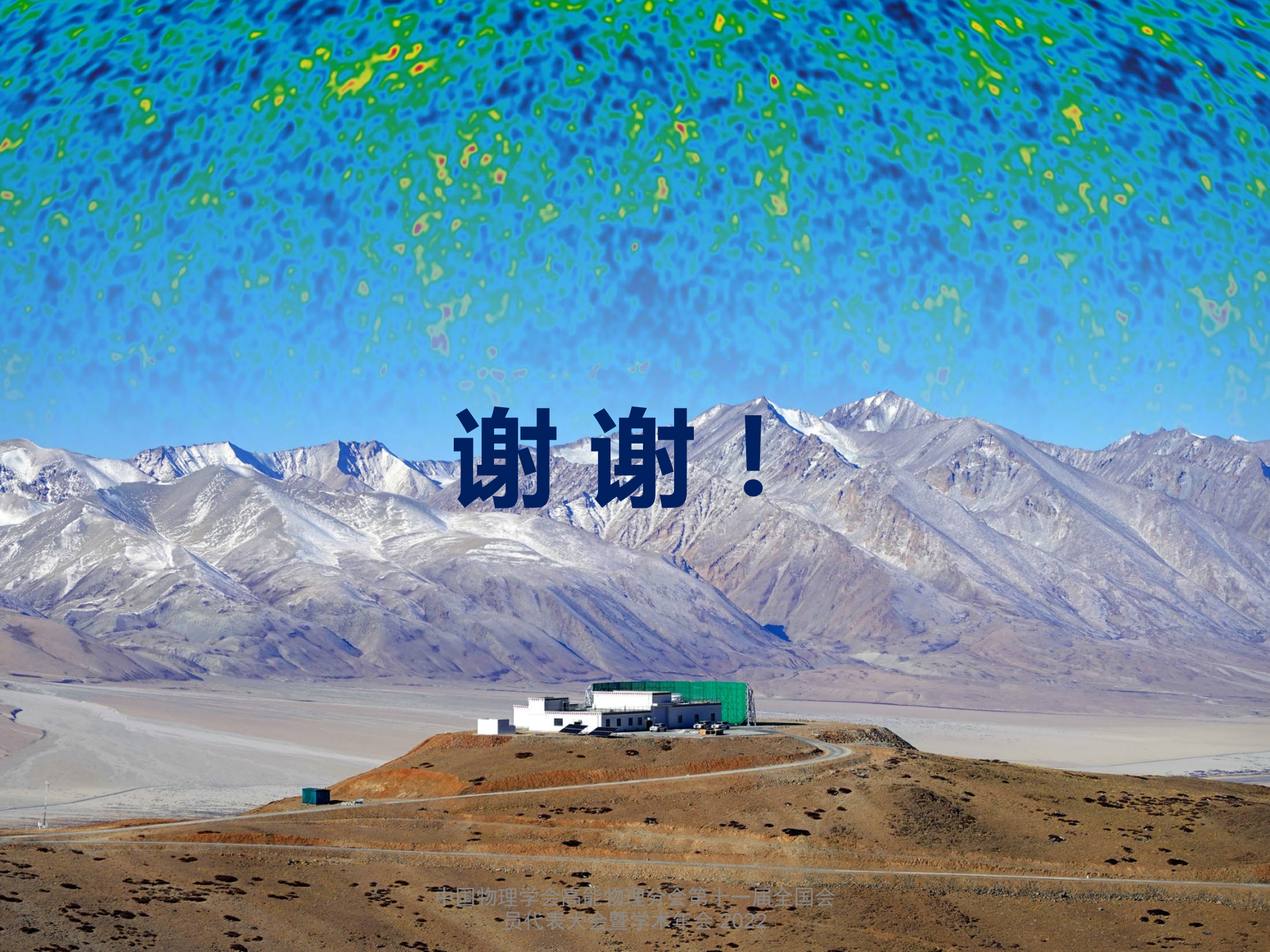
总结&下一步计划

总结:

- 基于开源代码在FPGA上实现了10G TCP和100G TCP
- 完成了对ZCU111的基本性能测试, 满足ALICPT-1试验电子学的需求
- 目前已经实现基于ZCU111和GPU的单通道ADC数据直传的实时处理

NEXT:

- 更改100G TCP -> 100G RoCEv2 降低CPU压力
- 基于RoCEv2开发无损数据多播协议满足天文学多目标的需求



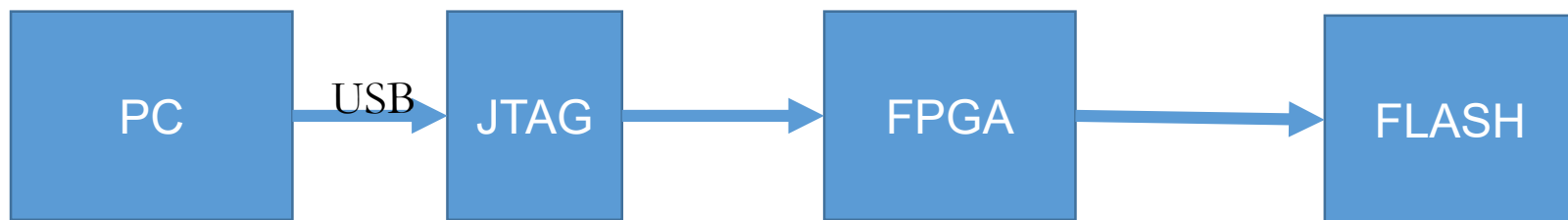
谢谢！

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会暨学术年会 2022

FPGA板

- 实现基于TCP协议的FPGA远程烧录及调试

标准FPGA烧录及调试流程



远程FPGA烧录及调试流程



ADC DAC 功能验证板设计框架

- ADC: AD9689 2.6Gsp/s、14bit
- DAC: AD9176 12.6GSPS、16bit
- PLL: LMK04828 <3.1GHz
- POWER: DC LTM4644, LDO TPS7A85

