

国家重点研发计划“高能量加速器关键技术研究”
项目2024年会

无线数据传输

胡俊, 江晓山, 严子越, 周星, 宋崇耀

中国科学院高能物理所

2024.11.29

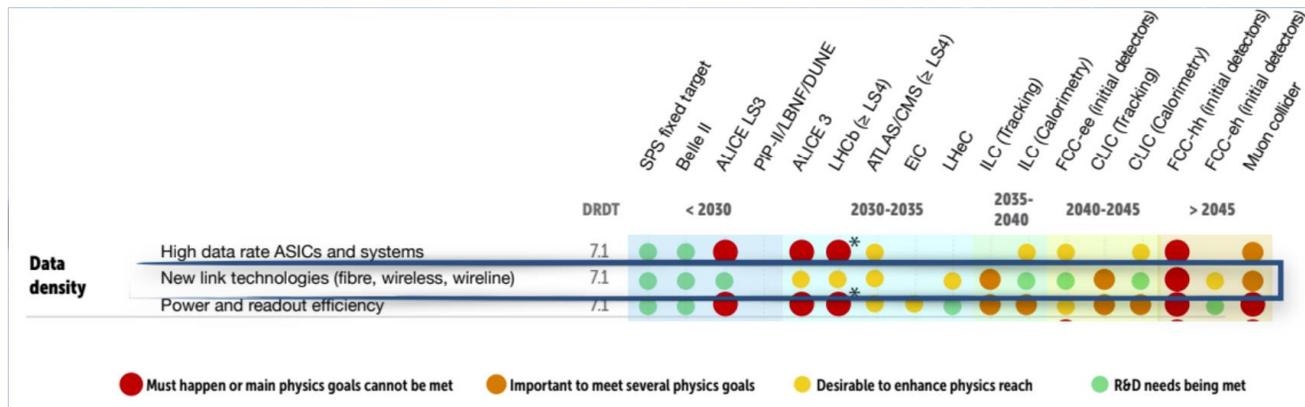
报告内容

- 研究背景
- 研究进展
 - Wi-Fi
 - 毫米波
 - 无线光传输
- 研究计划

研究背景

■ 无线传输的优势

- 降低了电缆、光纤和连接器的物质量，同时减少了死区，提高了探测效率。
- 安装和维护更加方便。
- 降低了相应的成本。



• MOST3预期成果

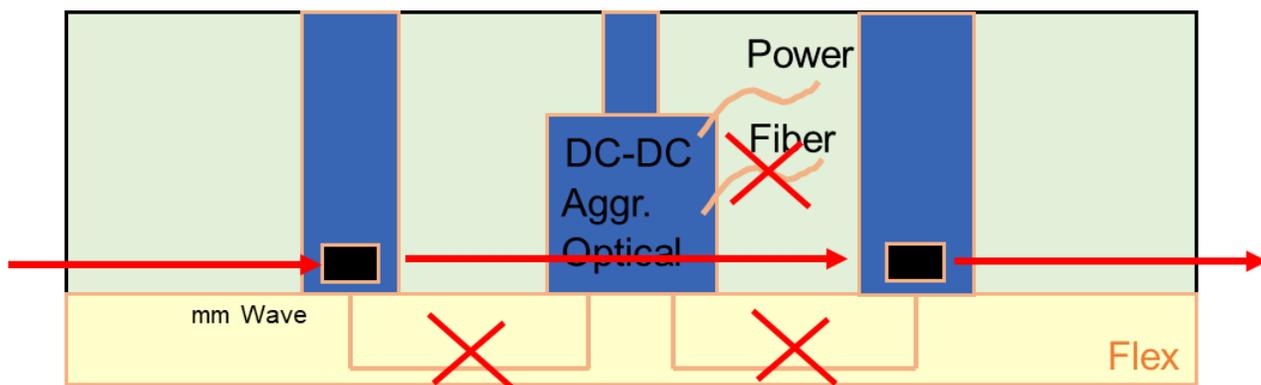
研发多通道无线数据传输原型系统，通过系统联调实验，研究无线传输系统对前端电子学和探测器的影响，实现总传输带宽 ≥ 30 Gbps，满足数据上传下发的需求，达到验收指标。

Wireless technologies proposed as key « New link technologies » to ECFA DRD7.1 roadmap,

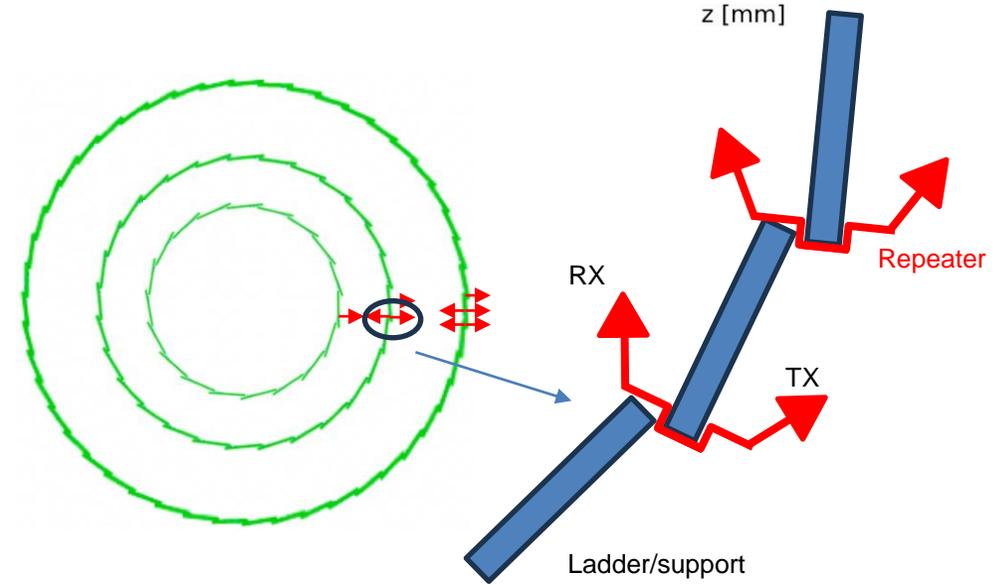
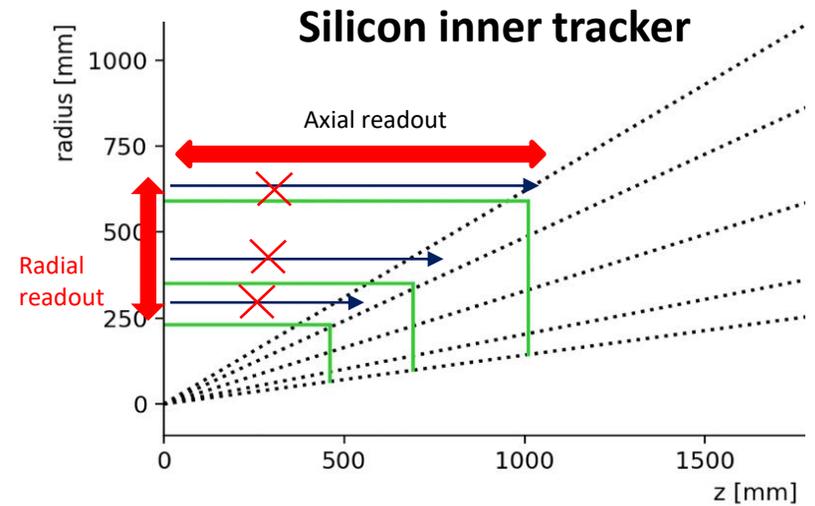
高能所团队已经以观察者身份加入DRD7.1合作组

无线数据传输方案

- 桶部层与层之间的径向数据读出
- 从桶部到端盖的轴向数据读出

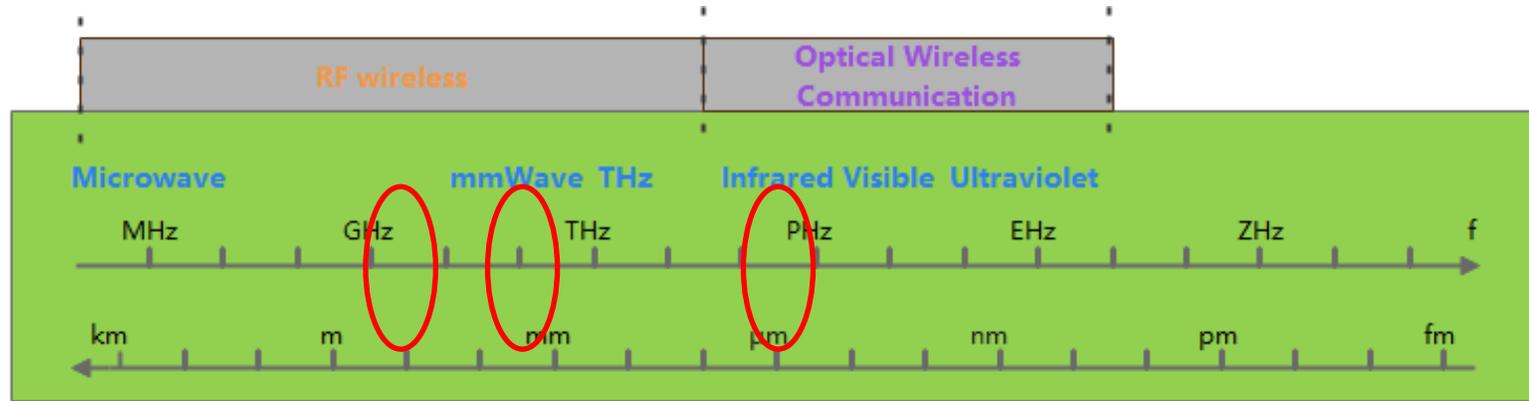


轴向数据读出



径向数据读出

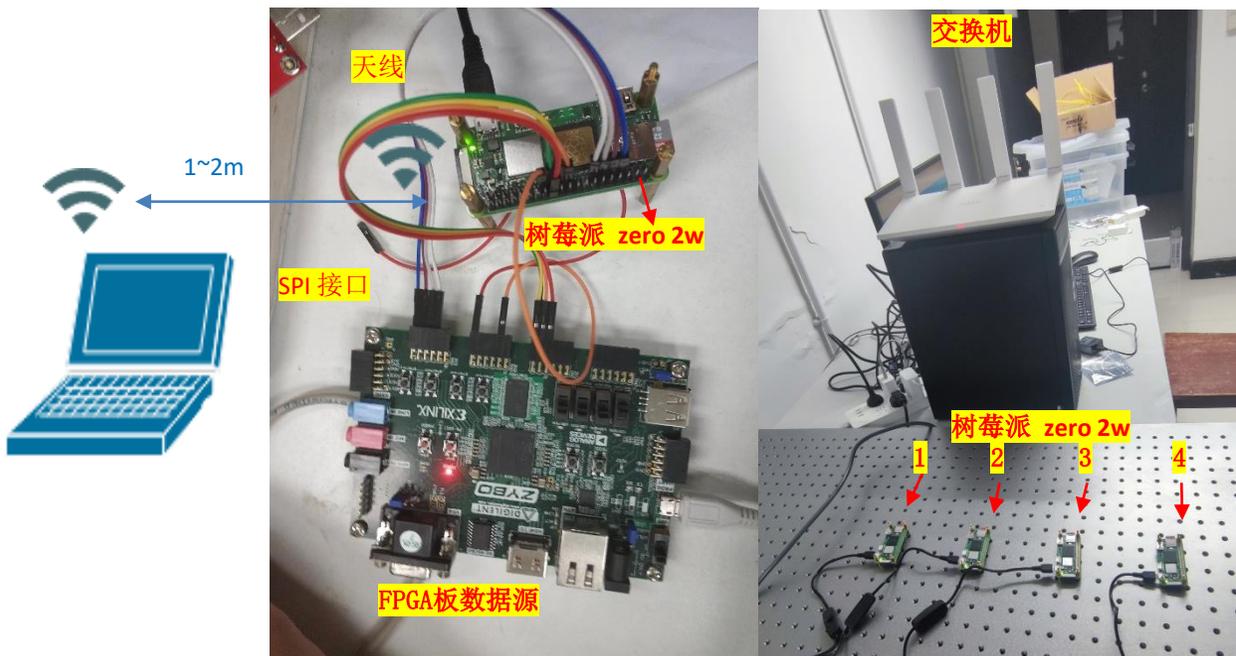
研究进展



电磁波频谱图

- Wi-Fi (2.4GHz, 5GHz)
- 毫米波
- 无线光传输

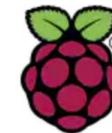
Wi-Fi 研究进展



基于树莓派的Wi-Fi测试

- 完成对传统Wi-Fi方案验证，选取了商用模块完成了单通道和多通道测试，得到了传输速率，功耗，传输距离，干扰等指标。

■ 基于树莓派Zero 2W



- 成熟的SOC系统，支持2.4GHz 802.11b/g/n
- 模块尺寸：6.5cm x 3cm，功耗：约2W
- 通过无线与PC连接时，上下行带宽均可达45 Mbps
- 由于占用相同频段，当4个端点连接到一个交换机时，带宽会共享
- 当两个独立端点相距超过2米时，它们之间才没有相互干扰

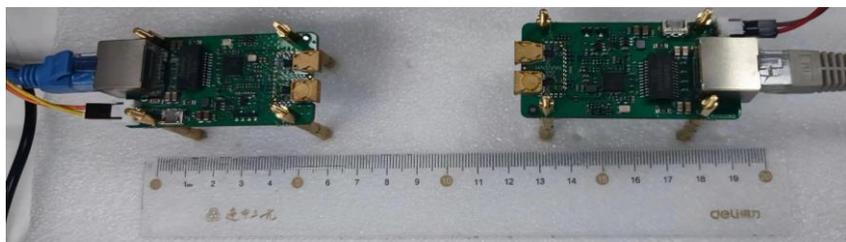
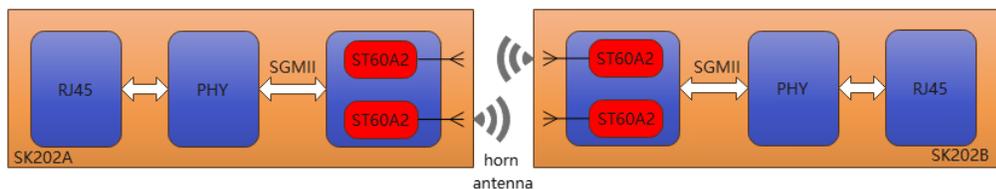
■ 可能的应用场景

- 尺寸和功耗限制了在探测器内部的使用
- 较低的带宽能力和广播特性适合传输DCS控制信息

毫米波研究进展

■ 毫米波特点

- 高带宽，低功耗
- 天线尺寸小型化，甚至可以集成到芯片中
- 在自由空间中损耗较大 (68dB@1m)，意味着干扰较低，不仅在频道之间，也包括与探测器之间的干扰
- 可实现高密度排布



毫米波测试板

■ 使用评估板进行测试 – SK202

- 基于意法半导体公司的商业60GHz射频芯片 ST60A2收发器
- 数据传输速率最高可达6.25 Gbit/s
- 芯片功耗: 44mW@TX, 27mW@RX



■ 带宽及传输距离测试

- 当距离小于5厘米时，传输速度可以达到900Mbps
- 当距离超过6厘米时，无法建立链接

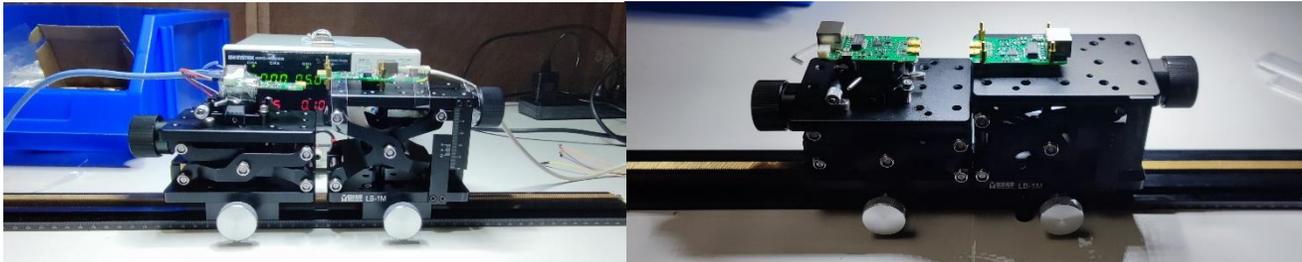
传输距离 (cm)	带宽 (Mbps)	丢包率
1	914	0.031%
3	917	0.061%
5	915	0.05%
6	913	0.13%
>6	No link	No link

带宽及传输距离测试

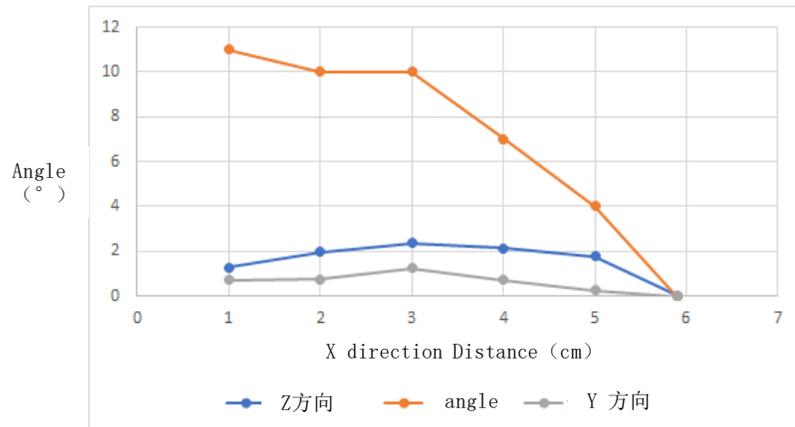
毫米波研究进展

■ 准直性测试

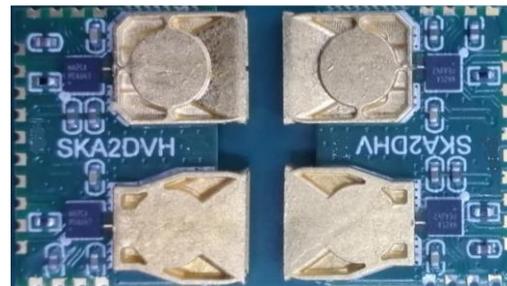
- 相较于光传输，毫米波对准直性要求较低
- 方向性与天线设计关系较大



准直性测试



毫米波传输准直性



测试板天线图

材料	厚度	穿透力
纸张	2mm	√
塑料	2mm	√
FR4 PCB	1.6mm	×
Flex	0.2mm	×

距离3cm条件下的穿透能力

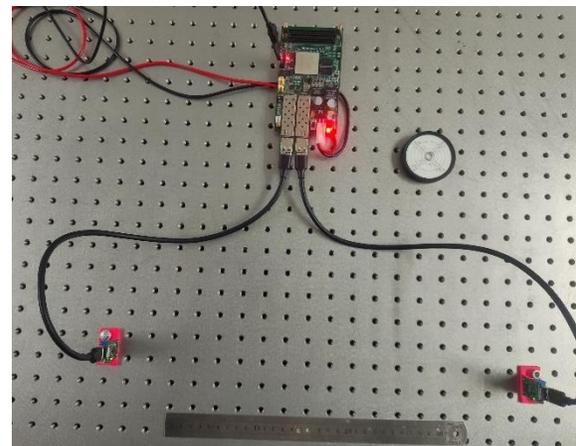
■ 穿透性测试

- 电路板中的金属层可以屏蔽毫米波的传输
- 可以据此考虑对信号干扰的屏蔽方案

毫米波研究进展

■ 长距离收发模组研制

- 天线尺寸及物质量显著减小
- 最远传输距离达到67.5cm @ 1.25Gbps
- 最大线速率达到6.6Gbps @22.5cm
- 天线设计在5Gbps附近优化, 以达到最远传输距离, 此时对齐要求 ± 2.5 cm @ 45 cm距离



Name	TX	RX	Status	Bits	Errors	BER	BERT Reset	TX Pattern	RX Pattern
Ungrouped Links (0)									
Link Group 0 (1)									
Link 0	Quad_115MGT_XOY0TX (ic7k329r_0)	Quad_115MGT_XOY0RX (ic7k329r_0)	5.000 Gbps	1.017E12	0E0	9.832E-13	Reset	PRBS 7-bit	PRBS 7-bit

1X10⁻¹² BER @ 5 Gbps

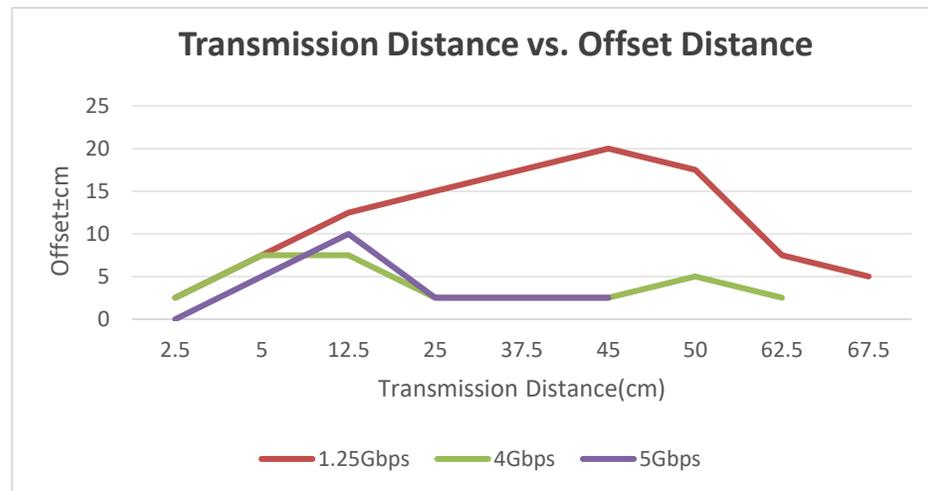
Name	TX	RX	Status	Bits	Errors	BER	BERT Reset	TX Pattern	RX Pattern
Ungrouped Links (0)									
Link Group 0 (1)									
Link 0	Quad_115MGT_XOY0TX (ic7k329r_0)	Quad_115MGT_XOY0RX (ic7k329r_0)	6.600 Gbps	1.014E12	0E0	9.861E-13	Reset	PRBS 7-bit	PRBS 7-bit

1X10⁻¹² BER @ 6.6 Gbps

误码率测试结果

Line rate (Gbps)	Stable distance (cm)	Connection distance (cm)
1.25	67.5	80
4	50	70
5	45	60
6.6	22.5	37.5

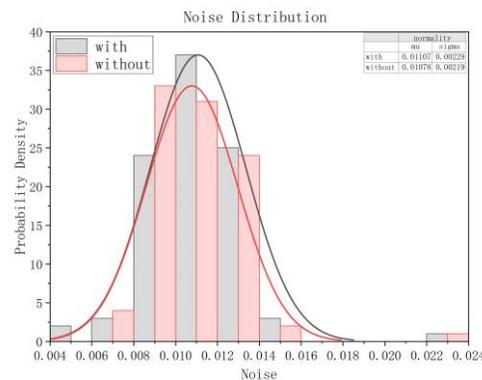
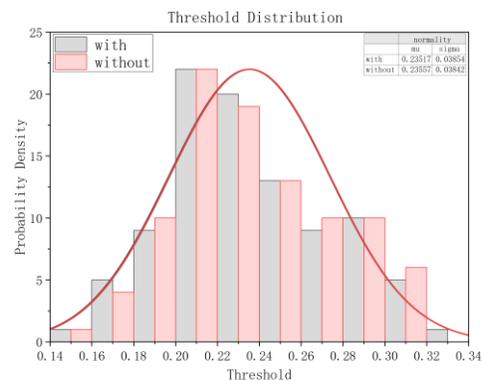
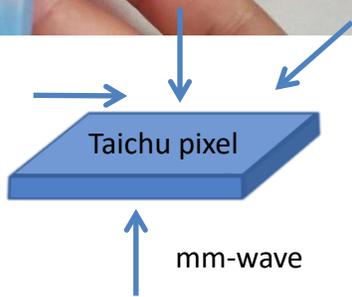
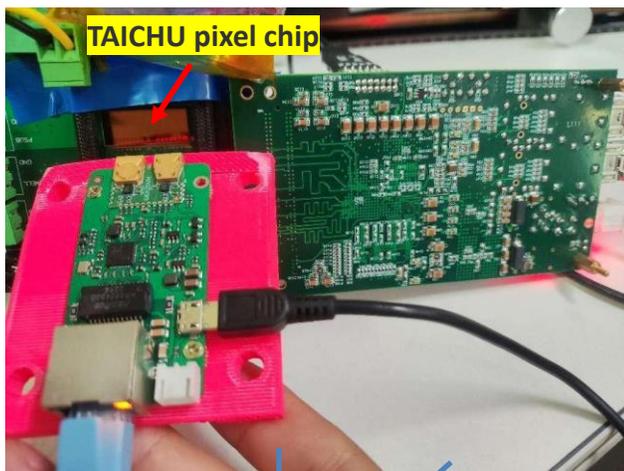
传输距离测试



毫米波研究进展

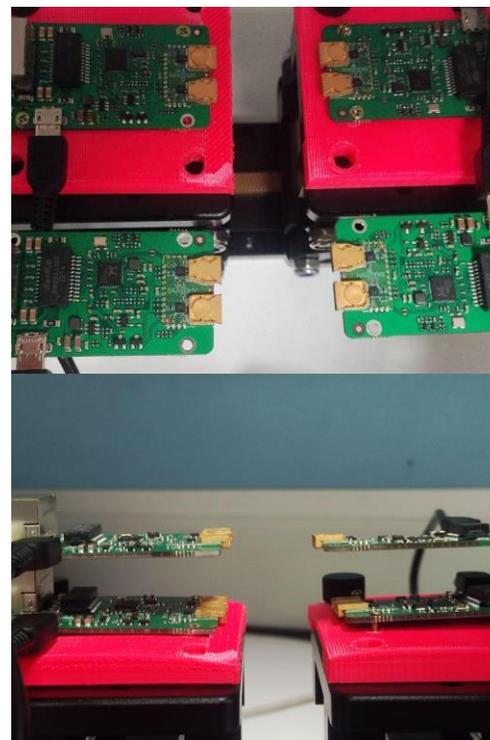
■ 与探测器的干扰测试

- 使用顶点像素原型芯片 TAICHU3
- 从不同方向和距离进行测试
- 对阈值与噪声的影响较小



■ 通道间串扰测试

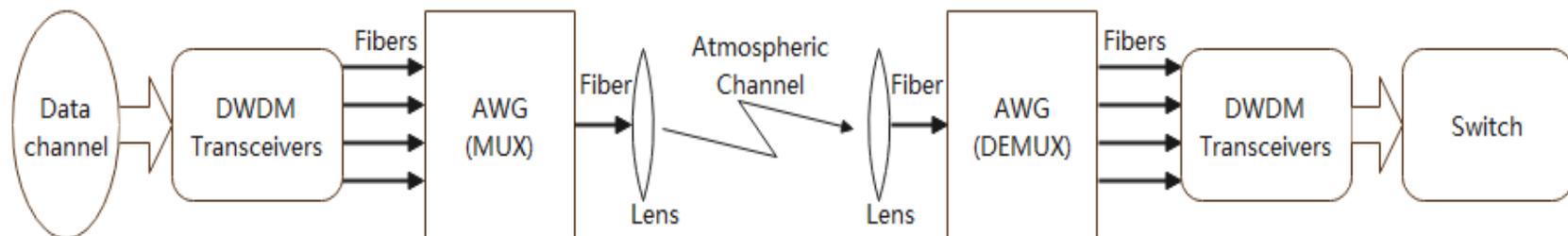
- 无论是垂直还是水平放置，在间距3cm范围时，不会影响传输
- 高密度排布成为可能



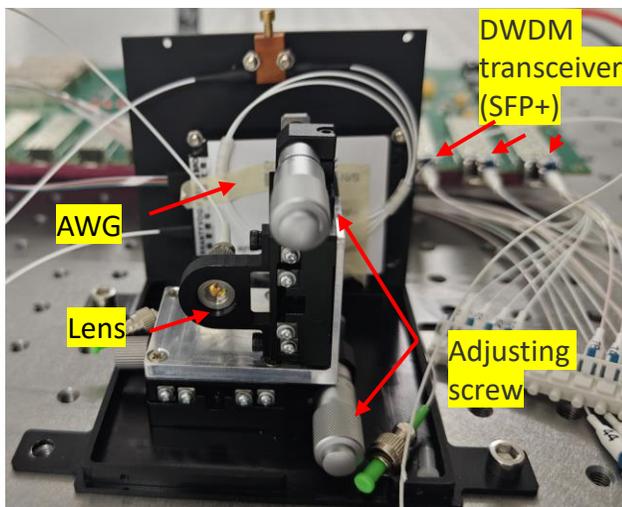
无线光传输研究进展

■ 无线光传输模组特点

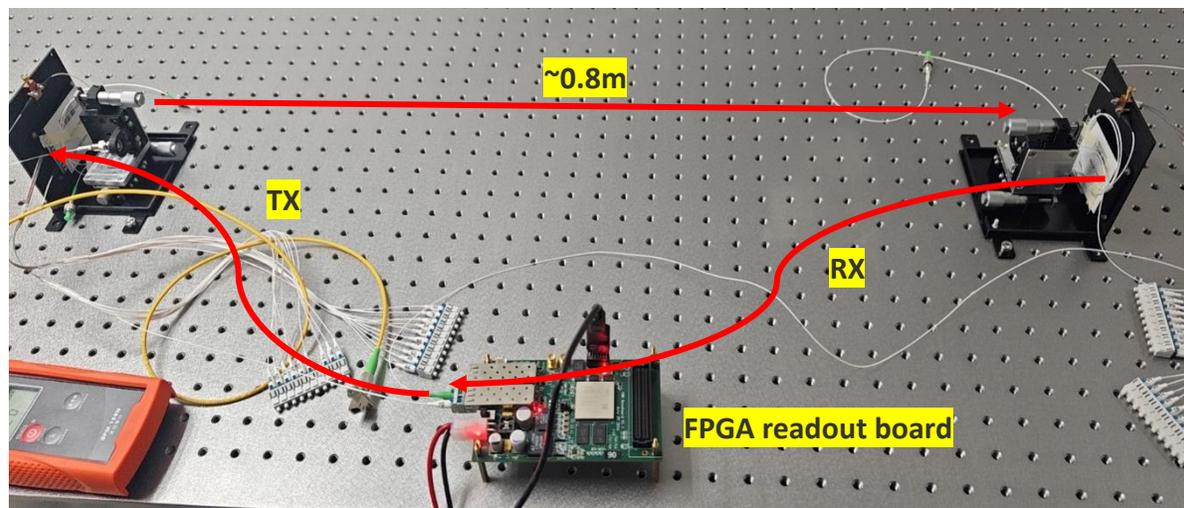
- 基于SFP光收发器
- 传输带宽极高
- 对准直要求高



无线光传输测试框图



光传输模组

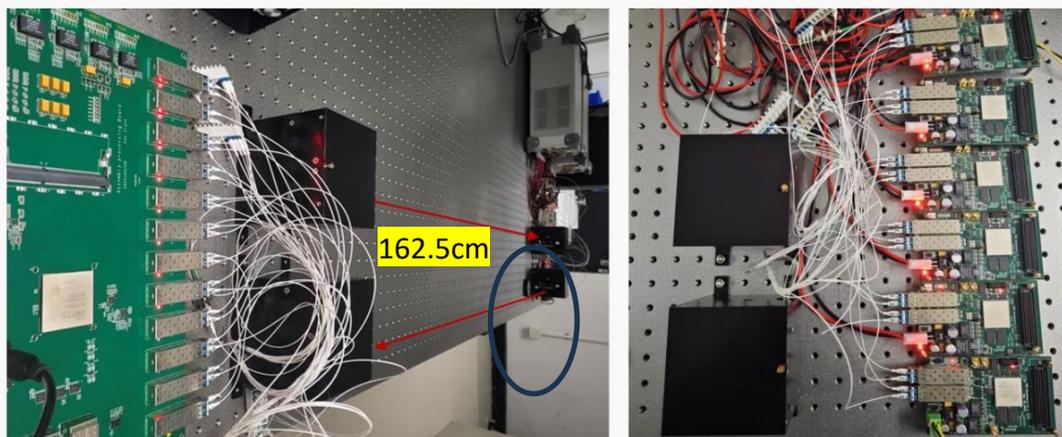


单通道回环测试



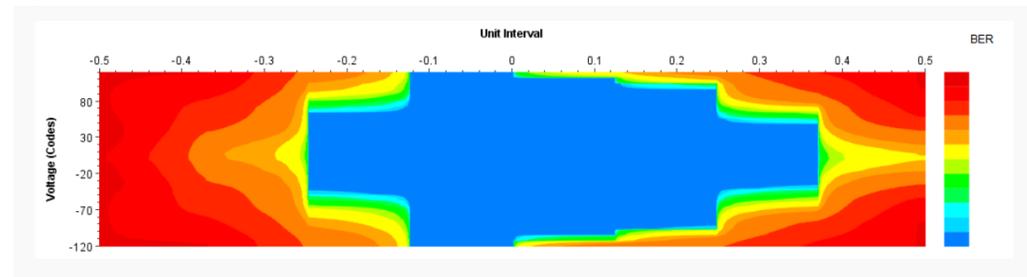
接收光功率:
-13.36dBm

无线光传输研究进展



多通道光传输PRBS回环测试

Name	TX	RX	Status	Bits	Errors	BER	BERT Reset	TX Pattern
Ungrouped Links (0)								
Found Links (12)								
Found 0	Quad_114/MGT_X1Y16/TX (xc7vx690t_0)	Quad_114/MGT_X1Y16/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	7.43E11	1.79E-3	Reset	PRBS 31-bit
Found 1	Quad_114/MGT_X1Y17/TX (xc7vx690t_0)	Quad_114/MGT_X1Y17/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 2	Quad_114/MGT_X1Y18/TX (xc7vx690t_0)	Quad_114/MGT_X1Y18/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 3	Quad_114/MGT_X1Y19/TX (xc7vx690t_0)	Quad_114/MGT_X1Y19/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 4	Quad_116/MGT_X1Y24/TX (xc7vx690t_0)	Quad_116/MGT_X1Y24/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 5	Quad_116/MGT_X1Y25/TX (xc7vx690t_0)	Quad_116/MGT_X1Y25/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 6	Quad_116/MGT_X1Y26/TX (xc7vx690t_0)	Quad_116/MGT_X1Y26/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 7	Quad_116/MGT_X1Y27/TX (xc7vx690t_0)	Quad_116/MGT_X1Y27/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 8	Quad_118/MGT_X1Y32/TX (xc7vx690t_0)	Quad_118/MGT_X1Y32/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 9	Quad_118/MGT_X1Y33/TX (xc7vx690t_0)	Quad_118/MGT_X1Y33/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 10	Quad_118/MGT_X1Y34/TX (xc7vx690t_0)	Quad_118/MGT_X1Y34/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit
Found 11	Quad_118/MGT_X1Y35/TX (xc7vx690t_0)	Quad_118/MGT_X1Y35/RX (xc7vx690t_0)	10.000 Gbps	4.15E14	0E0	2.41E-15	Reset	PRBS 31-bit

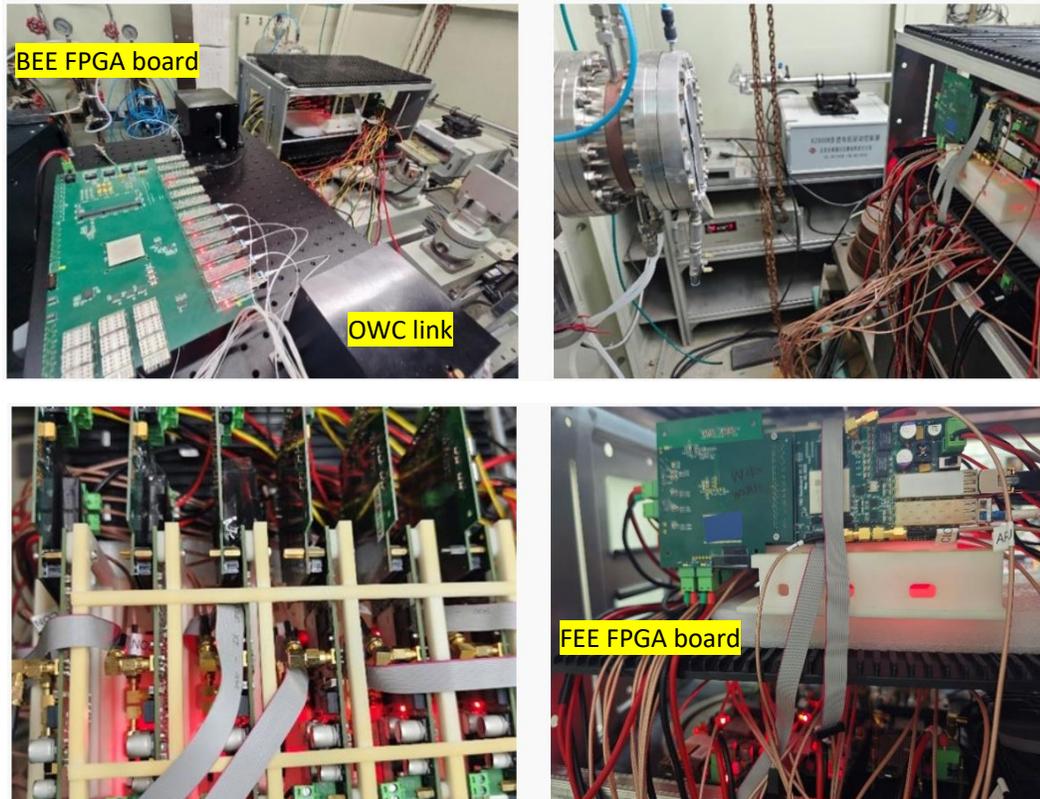


10Gbps 回环测试误码及眼图

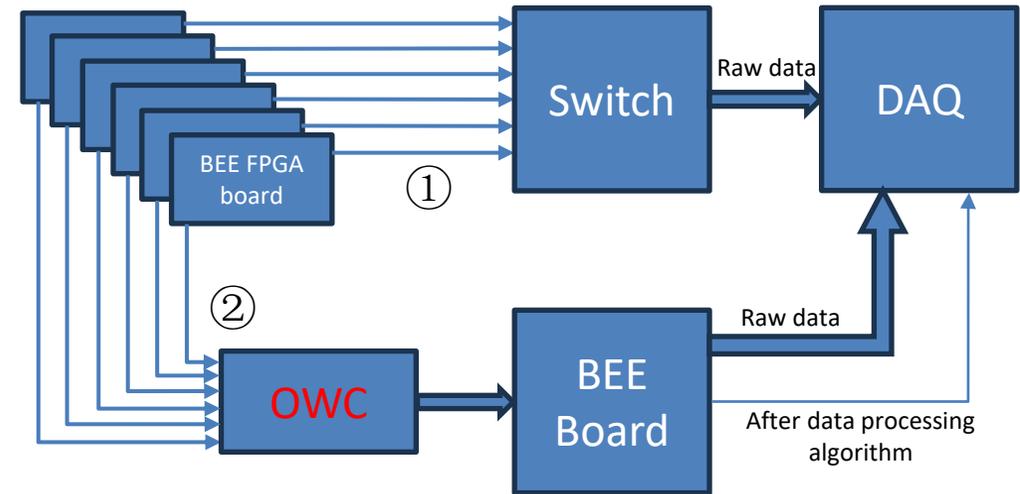
■ 短距离无线光传输的系统搭建及误码率测试

- 传输距离1.7m
- PRBS 31bits 误码率 < BER-15 @ 8Gbps X 1 通道 + 10Gbps X 11 通道

无线光传输研究进展



Telescope prototype test in BSRF



- 利用MOST2望远镜系统，在同步辐射线站验证无线光传输质量，总计运行2086分钟。
- 通过有线光纤传输的原始数据① 与通过 OWC 传输到BEE板的数据② 100%一致。

总结及研究计划

- 开展多种技术的调研，针对Wi-Fi，毫米波和无线光通信搭建了相应的测试系统并完成了部分性能的测试。
 - 完成了探测器应用可行性研究，通过对毫米波模组的性能测试，得到了传输速率，传输距离，与探测器干扰，通道间串扰等关键指标，基本解决了毫米波技术在探测器应用中的关键问题。
 - 完成了短距离无线光传输的系统搭建及误码率测试。
- 计划进一步完成性能评估，开展多通道集成以及与探测器结合的测试。

会议报告

- CPEC EU workshop 2024, 4月@马赛, *Status of the Wireless Transmission Application for CEPC*
- CPEC workshop 2024, 10月@杭州, *Progress in Wireless Data Transmission for Detector Readout*
- WADAPT General Meeting, <https://indico.cern.ch/event/1456402/> 远程报告, *Wireless studies in China*

谢谢!