

# 无线数据传输应用讨论

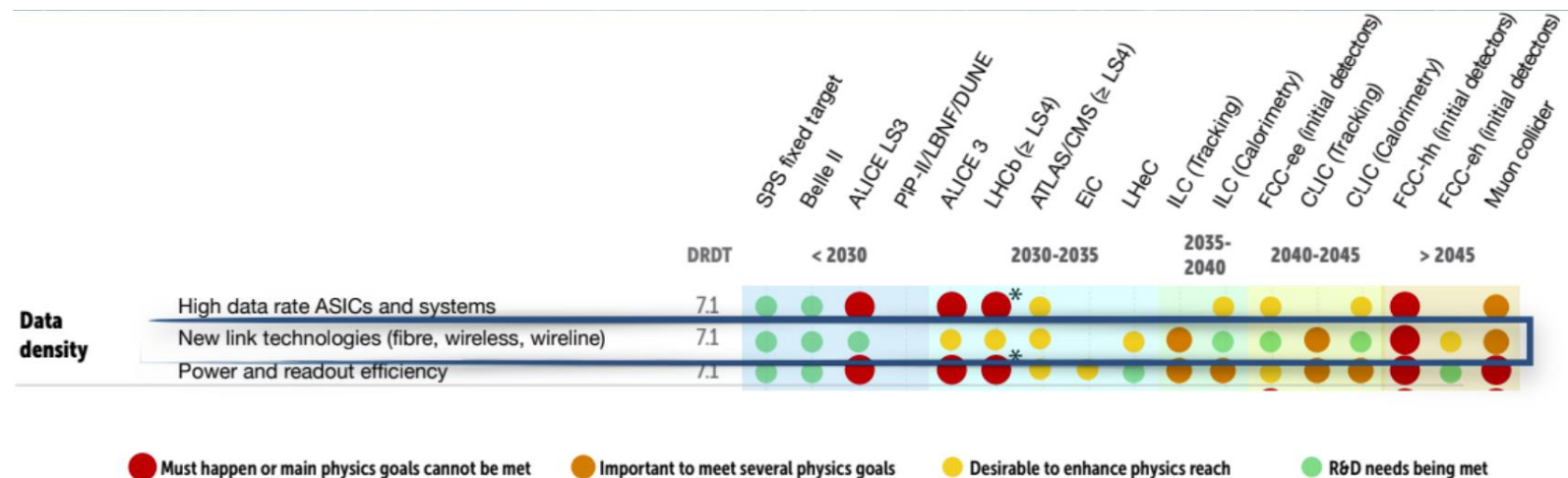
胡俊，江晓山，严子越，周星，宋崇耀

2025.6.6

# 研究背景

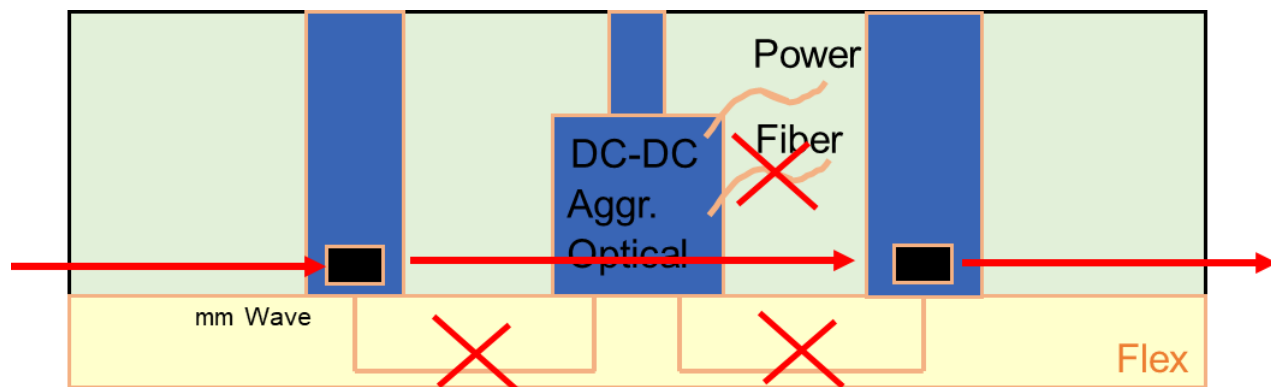
## ■ 无线传输的优势

- **降低物质质量**：减少电缆、光纤和连接器的使用，同时减小探测盲区。  
→ 显著提升探测效率与分辨率！
- **便于安装维护**：简化数据传输节点的布局部署。
- **降低成本**：无需电缆、光纤和连接器。

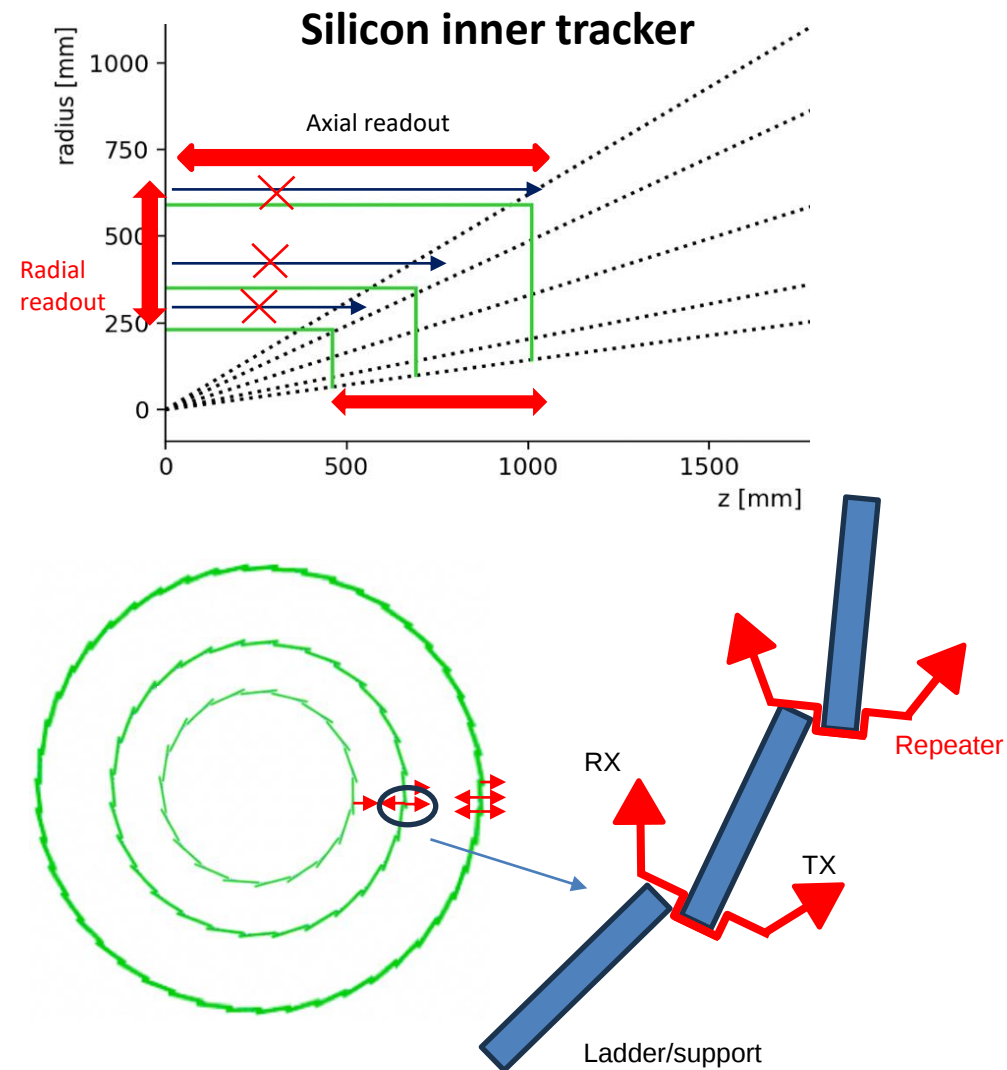


# 无线数据传输方案

- **桶部径向数据读出：** 与传统数据读出方式相比，提供新的数据传输路径，减小探测器内部的质量。
- **桶部到端盖的轴向数据读出：** 替代光纤，节省空间与质量。
- **端盖数据读出：** 将数据集中至端盖边缘，降低电缆布线的复杂性。

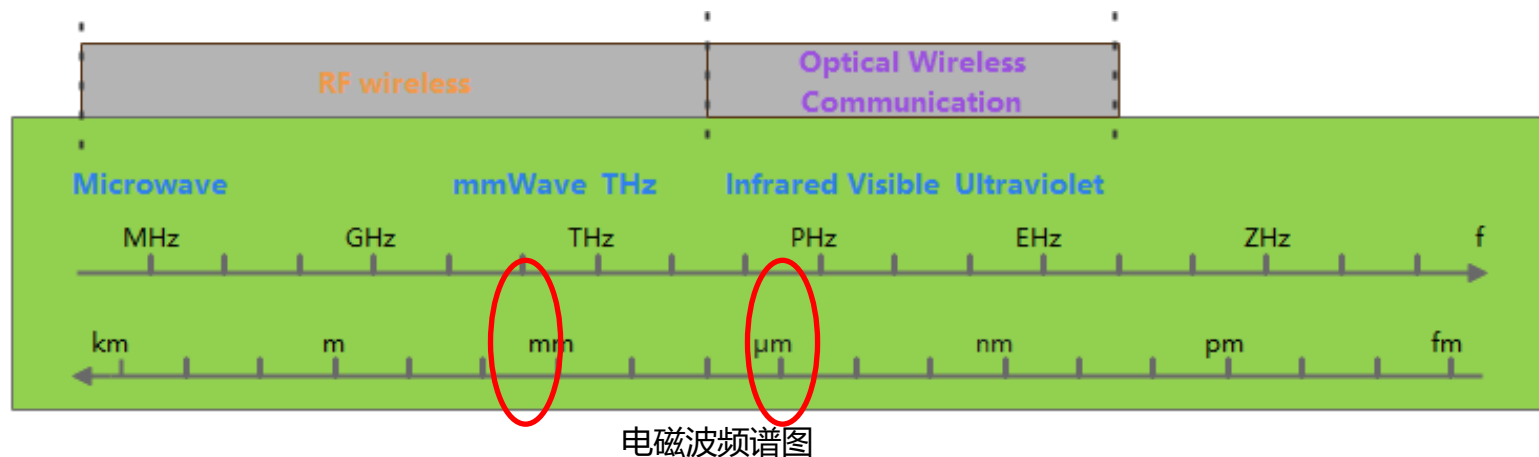


轴向数据读出



径向数据读出

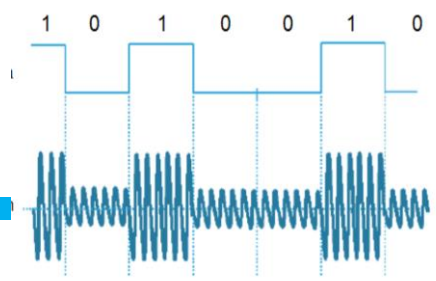
# 研究方向



- **毫米波: Millimeter Wave (60GHz)**
  - 高带宽, 低功耗
  - 天线尺寸小型化, 甚至可以集成到芯片中
  - 通道之间干扰较低, 与探测器之间的干扰小
  - 技术成熟度中等

- **无线光传输: Optical wireless communication (OWC) / Free Space Optical(FSO)**
  - 传输带宽极高
  - 技术成熟度较高
  - 对准直度要求高

# 毫米波研究进展



非相干调制的结构比较契合我们的需求。

## ■ 需要解决的技术难题

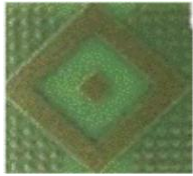
- **毫米波收发器的选型**：抗辐照，低功耗，高带宽
  - 现阶段定制射频芯片成本较高。
  - 市场上没有能完全满足我们需求的商用芯片，只找到一款接近我们需求的收发器芯片，可以用来测试毫米波性能。
- **满足需求的天线设计**：小体积，小物质量
  - 国内能实现的较多，我们联系了中科院微电子所和第三方公司，帮助实现天线定制化。
- **系统整合**
  - 完成各种性能测试
  - 解决降低串扰、提高通道密度的问题
  - 搭建小系统模型

| 收发器结构 | 相干调制                      | 非相干调制                  |
|-------|---------------------------|------------------------|
| 主要特点  | 需要载波同步（数字基带电路，锁相环等），电路复杂。 | 无需相位同步（依赖差分或包络检测），结构简单 |
| 传输速度  | 极高，带宽效率高                  | 相对低                    |
| 功耗    | 高                         | 低                      |
| 适用场景  | 高精度，高带宽通信                 | 短距离，低功率通信              |

| 天线种类 | 号角天线           | PCB天线        |
|------|----------------|--------------|
| 主要特点 | 金属制成，独立安装，体积较大 | 集成在PCB上，一体设计 |
| 方向性  | 波束窄，串扰小        | 波束宽，串扰大      |
| 增益   | 增益高（20dbi）     | 增益低（3dbi）    |
| 性能效率 | 效率高，损耗低        | 效率中等         |
| 成本   | 高，加工复杂         | 低，设计灵活       |



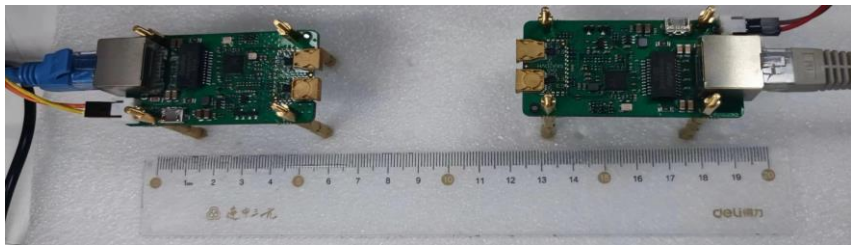
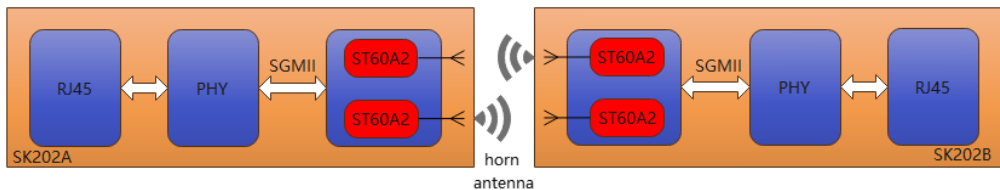
号角天线



PCB Patch 天线

由于物质量和体积的要求，我们只能采用PCB patch天线，需要相关设计能力。

# 毫米波商用收发器



| Distance (cm) | Bandwidth (Mbps) | Packet loss rate |
|---------------|------------------|------------------|
| 1             | 914              | 0.031%           |
| 3             | 917              | 0.061%           |
| 5             | 915              | 0.05%            |
| 6             | 913              | 0.13%            |
| >6            | No link          | No link          |

Test result at different distances of TX/RX

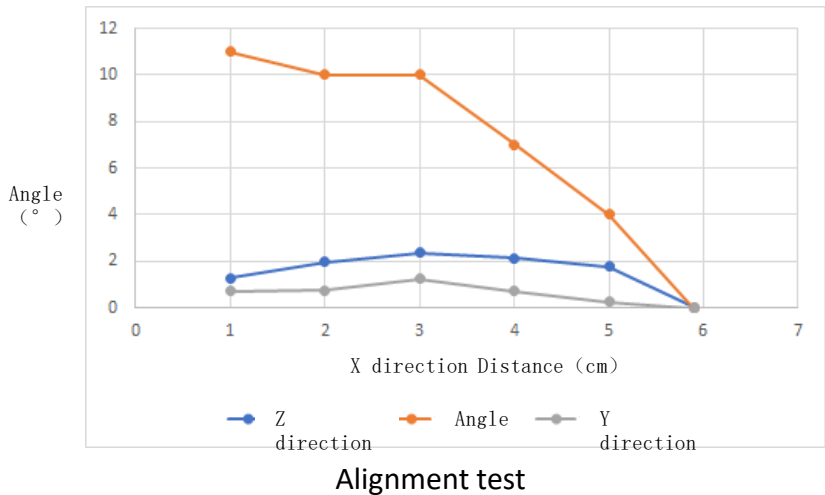
| Material      | Thickness | Penetration Ability |
|---------------|-----------|---------------------|
| Paper         | 2mm       | √                   |
| Plastic ruler | 2mm       | √                   |
| FR4 PCB       | 1.6mm     | ×                   |
| Flex          | 0.2mm     | ×                   |

Penetration Test with 3 cm distance

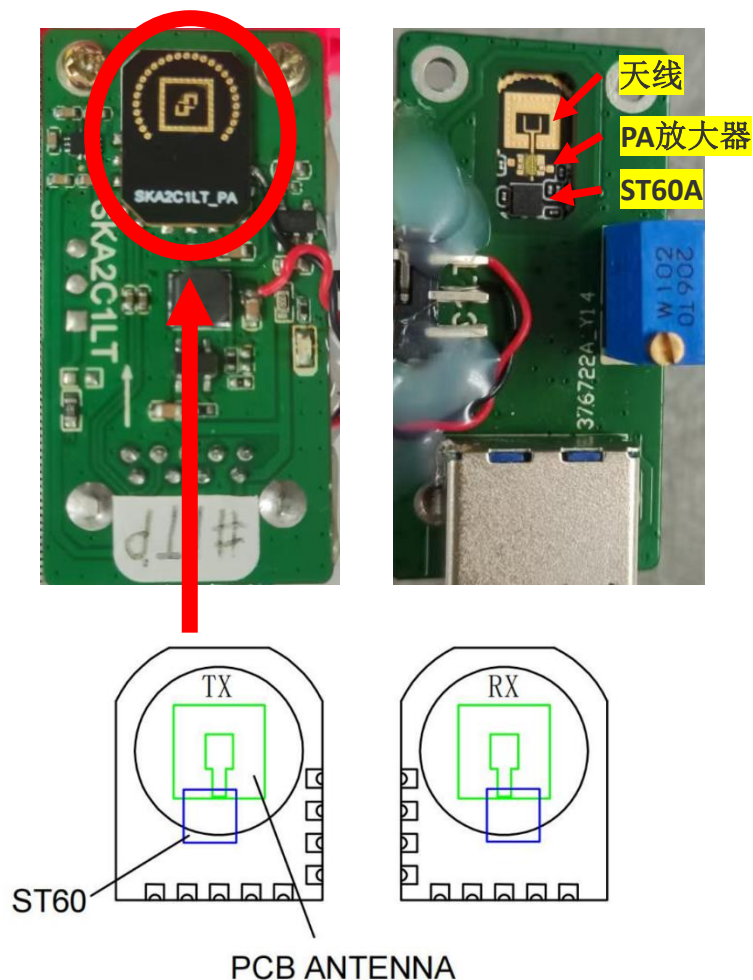
## ■ 使用评估板 SK202 进行测试

- 基于意法半导体商用 60GHz 射频芯片 ST60A2G0 收发器
- 传输距离小于 6 厘米时，传输速率可超过 900Mbps
- 60GHz 毫米波可穿透纸张、塑料等材料，但因铜层屏蔽效应无法穿透 FR4 印刷电路板或柔性线缆
- 相比光通信，毫米波对设备对准精度要求较低
- 功耗：约 0.5W（发射+接收）

**主要问题：**  
传输距离过近  
传输速率不高  
天线尺寸过大



# 长距离毫米波收发模组研制



## ■ 长距离毫米波收发模组

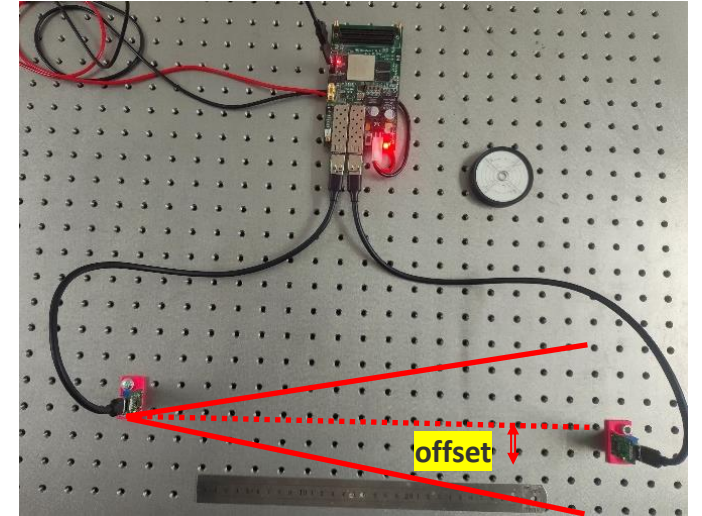
- 基于ST60A2 收发器 + PA 放大器（裸片）
- 采用PCB天线，尺寸及物质量显著减小
- 邮票孔接口，外围电路简单。
- 尺寸：**14mm x 9mm**

## ■ 对输入信号的要求

- SLVS 100Mbit/s – 6.25Gbit/s
- 8b10b编码
- 需要preamble，以满足ST60A2的启动时间要求
- 与FPGA的高速串行接口兼容

# 传输性能测试

- 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 $\pm 2.5$  cm @ 45 cm距离



Alignment test

| Name                 | TX                              | RX                              | Status     | Bits     | Errors | BER       | BERT Reset | TX Pattern | RX Pattern |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|----------|--------|-----------|------------|------------|------------|
| Un grouped Links (0) |                                 |                                 |            |          |        |           |            |            |            |
| Link Group 0 (1)     |                                 |                                 |            |          |        |           |            |            |            |
| Link 0               | Quad_115MGT_X0Y0/TX (nc7k328_0) | Quad_115MGT_X0Y0/RX (nc7k328_0) | 5.000 Gbps | 1.017E12 | 0E0    | 9.832E-13 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit |

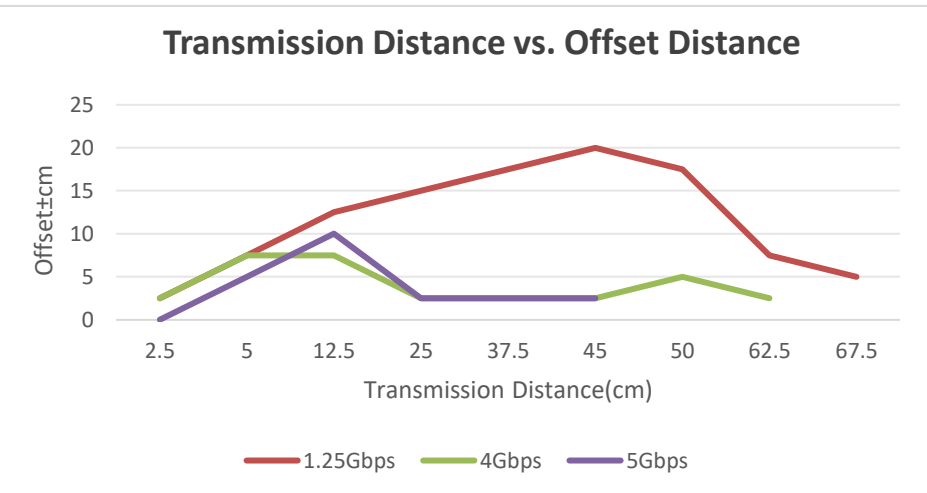
1X10<sup>-12</sup> BER @ 5 Gbps

| Name                 | TX                              | RX                              | Status     | Bits     | Errors | BER       | BERT Reset | TX Pattern | RX Pattern |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------|----------|--------|-----------|------------|------------|------------|
| Un grouped Links (0) |                                 |                                 |            |          |        |           |            |            |            |
| Link Group 0 (1)     |                                 |                                 |            |          |        |           |            |            |            |
| Link 0               | Quad_115MGT_X0Y0/TX (nc7k328_0) | Quad_115MGT_X0Y0/RX (nc7k328_0) | 6.600 Gbps | 1.014E12 | 0E0    | 9.861E-13 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit |

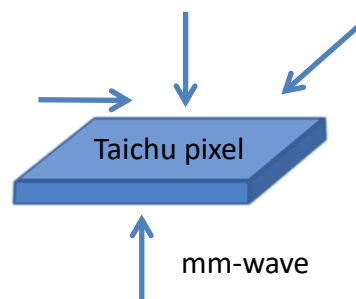
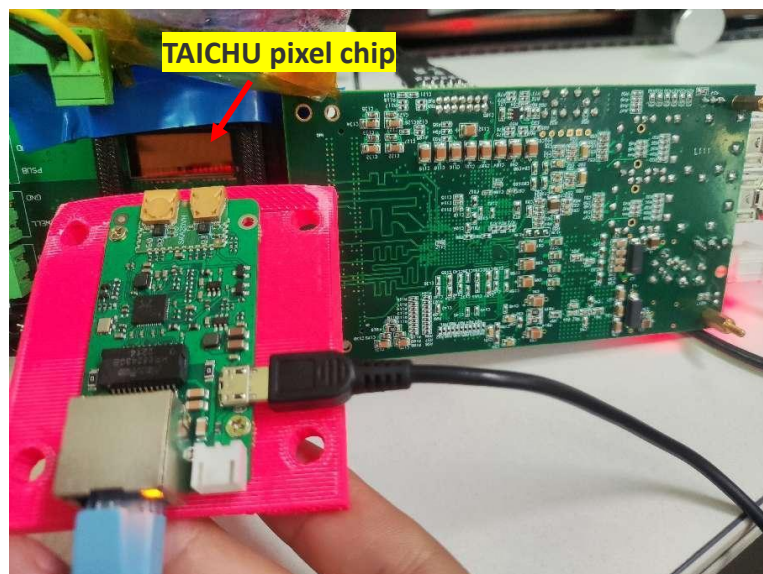
1X10<sup>-12</sup> BER @ 6.6 Gbps  
IBERT results

| 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                     |

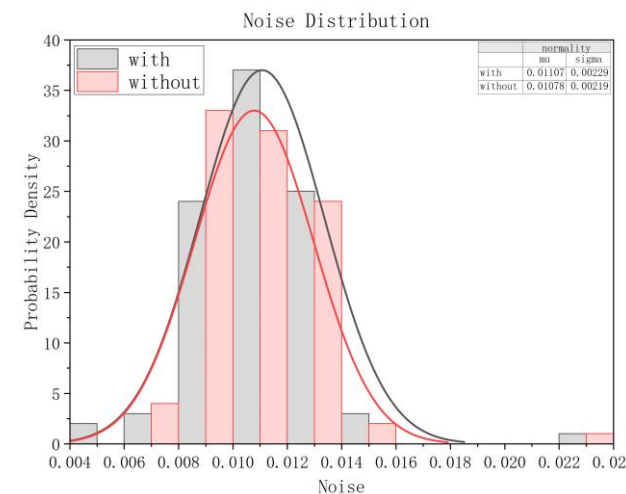
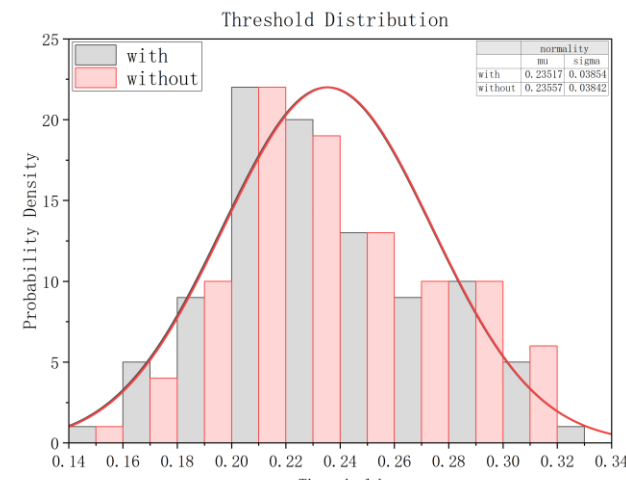
不同线速率条件下最远传输距离



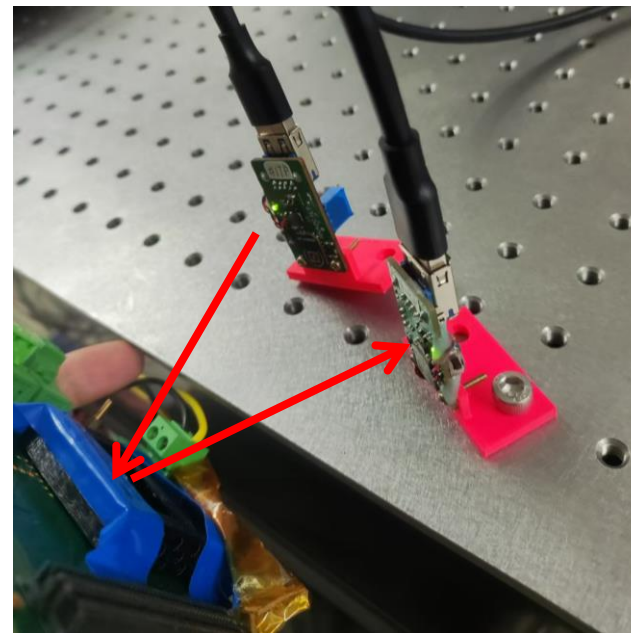
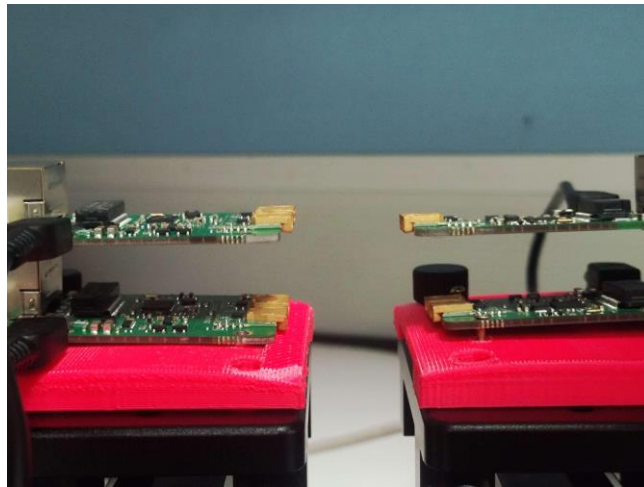
# 与探测器的干扰测试



- 使用顶点像素原型芯片 TAICHU3
  - 测试2种模组（短距离和长距离模组）
  - 从不同的方向和距离靠近Taichu3
  - 评估对芯片阈值和噪声的影响
- 测试结果表明60GHz毫米波对探测器信号的影响很小。而探测器信号同样很难影响毫米波信号的传输。



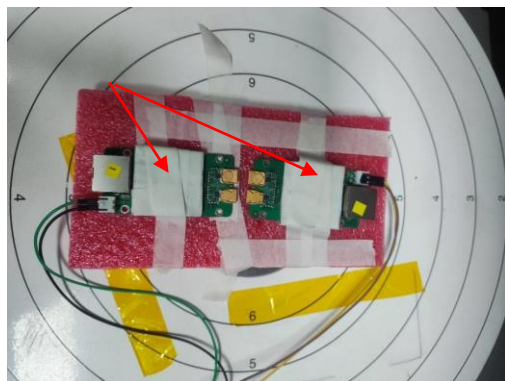
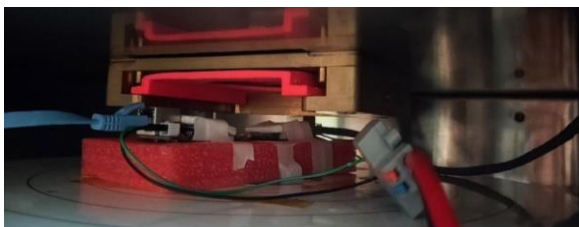
# 串扰测试



- 对于小功率模组+号角天线，无论是垂直放置还是水平放置，最小到3厘米的距离都不会影响传输，可以实现高密度的放置。

- 测试高功率模块时发现，被平面反射的射频信号仍然可以被识别并建立通信。如何消除？
  - 根据需求调整天线设计以改善方向和增益特性
  - 设计屏蔽结构
  - 寻找吸收率高的材料

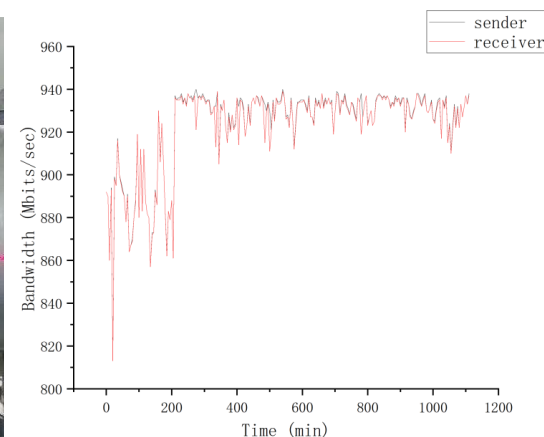
# 辐照测试



能量: 20keV  
剂量率: 21.2krad/min  
实验时长: 5.5小时 (7 Mrad)



散裂中子源白光中子束流



中子辐照过程中通信带宽变化

束流强度:  $1.65 \times 10^7 n_{eq}/cm^2$   
吸收系数: 0.95  
实验时长: 21小时  
(  $1.2 \times 10^{12} n_{eq}/cm$  )

## ■ 总剂量测试

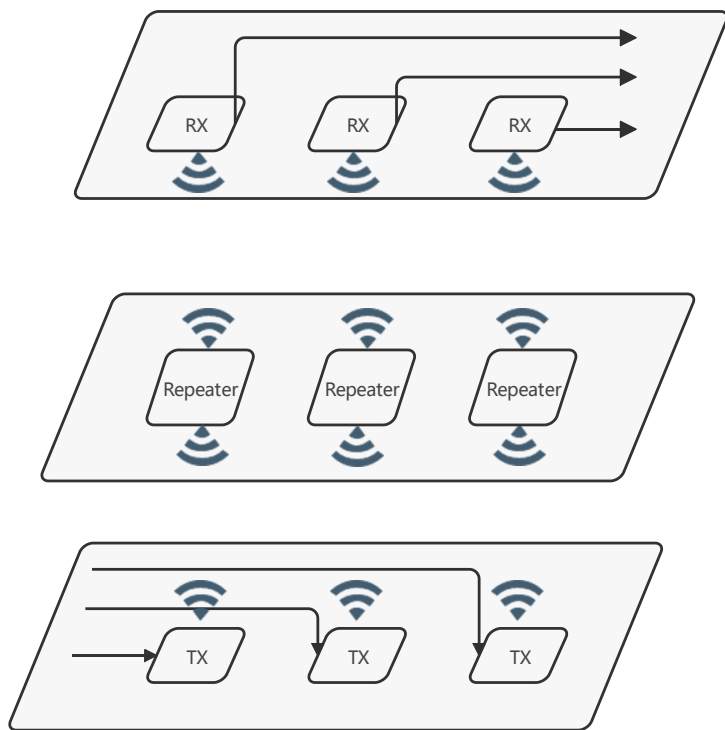
- 目标值: 总剂量5 Mrad (Si)
- 辐照过程中实时监测, 无线通信均正常。

## ■ 非电离能损测试

- 目标值:  $0.97 \times 10^{12} n_{eq}/cm$  (1MeV等效中子)
- 辐照过程中实时测试带宽, 传输速率基本无影响。

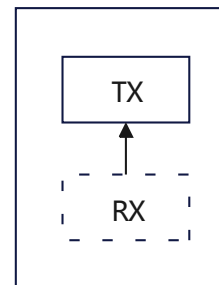
# 毫米波小系统模型

- 计划搭建一个3层的数据传输模型



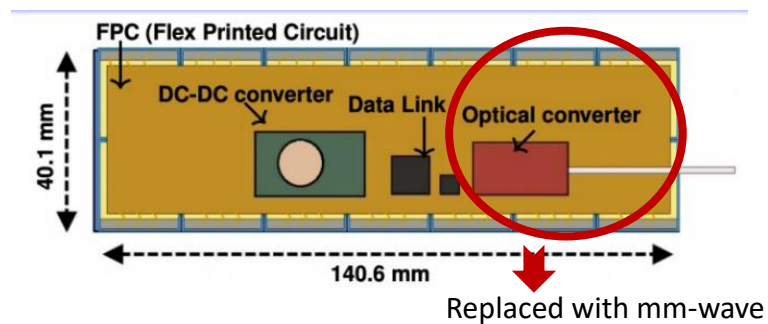
从上到下依次是 接收层，中继层，发送层

- 单通道的RX，TX节点已经得到验证
- Repeater的设计拟采用双面PCB结构，正在设计中

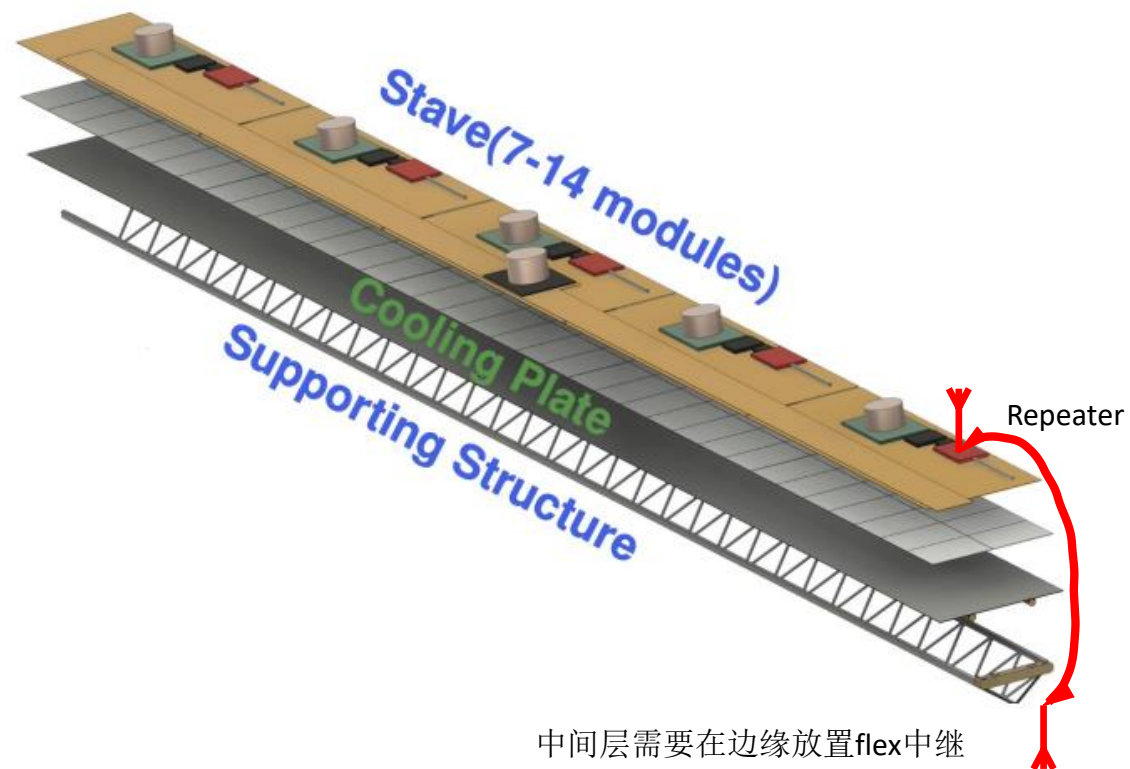


Repeater 结构：  
RX在PCB底层，TX在PCB顶层

# 应用讨论

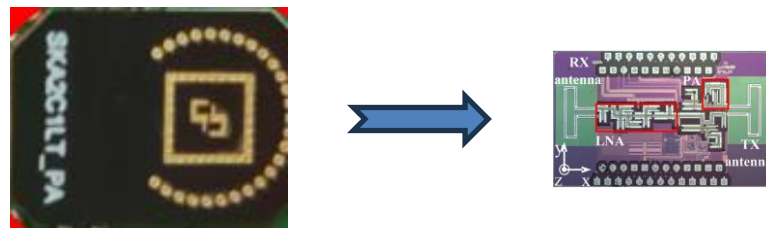


- 替代OTA模组+光纤
- 还存在的问题
  - 上行数据与下行配置的共用问题
  - 时钟传输问题
  - 密集通道的串扰问题



# 毫米波研究进展小结

- 协同创新方面：联合中科院微电子所、ST科技公司、华为公司的专业团队，通过多次讨论，技术路径优化，最终构建了可批量获取的毫米波系统解决方案。
- 技术突破层面：针对我们的需求，研制长距离小尺寸的模组，完成单通道的样机研制，通过性能测试，**基本解决了毫米波技术在探测器应用中的关键问题。**
- 后续推进
  - 模组量产，由于模组采用裸片打线，在生产、运输及测试过程中易损坏，批量生产良率不高。预计6月初能拿到200个新模组。
  - 推进基于新模组的自主设计repeater，完成小型化系统的集成，今年内完成。
  - 未来尝试收发器及天线集成芯片的设计，进一步减小核心模组的体积和功耗。



谢谢！

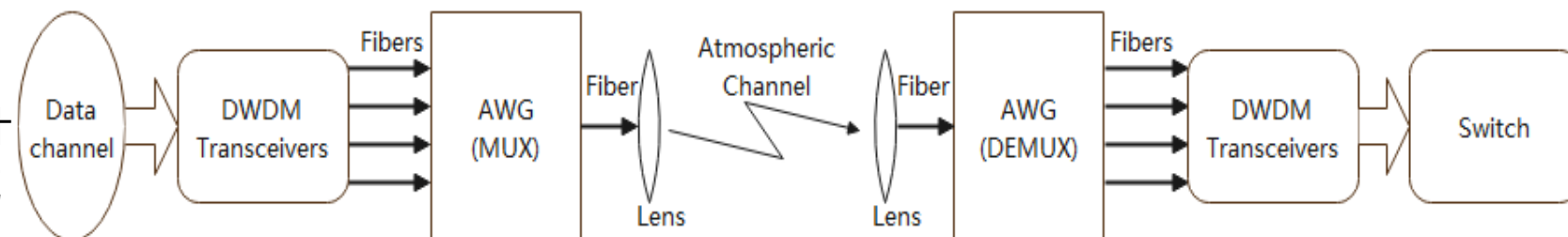




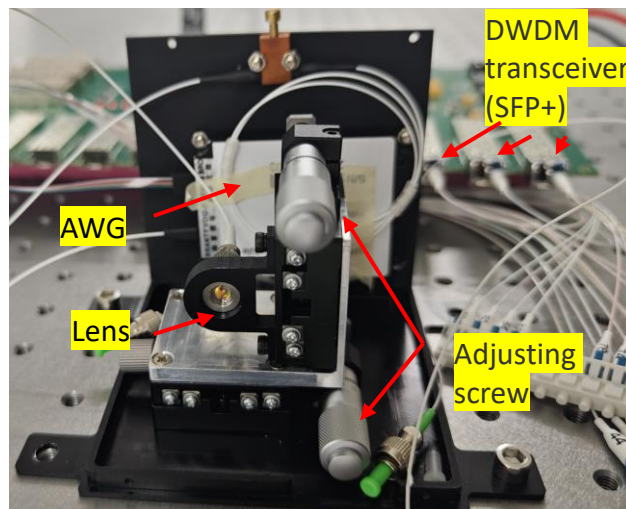
# 无线光传输研究进展

## ■ 无线光传输模组设计

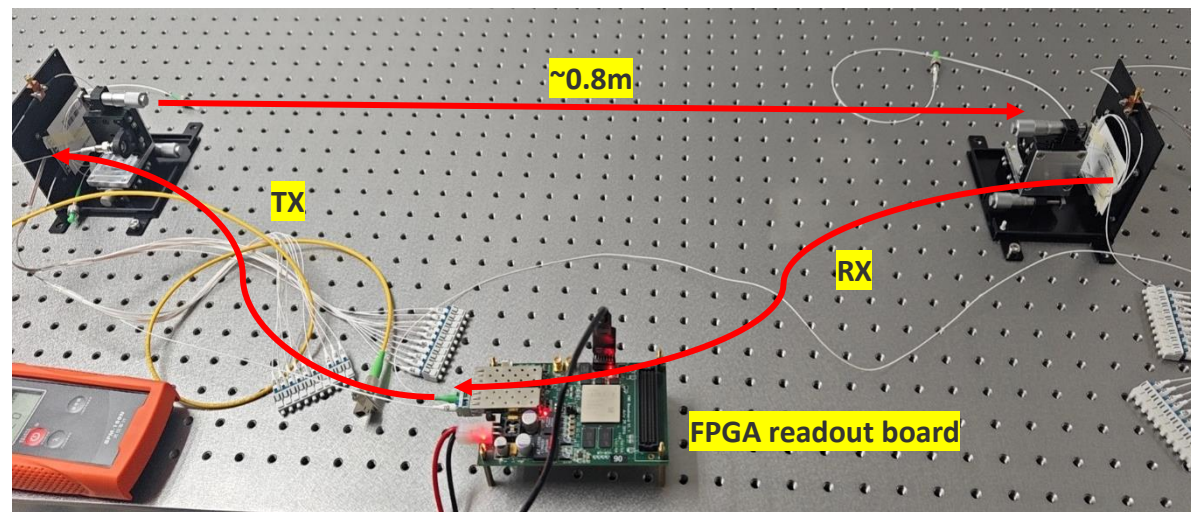
- 与中科院半导体所合作设计
- 基于SFP光收发器，与传统有线光纤系统兼容
- 利用全商业器件进行技术应用探索



无线光传输测试框图



光传输模组

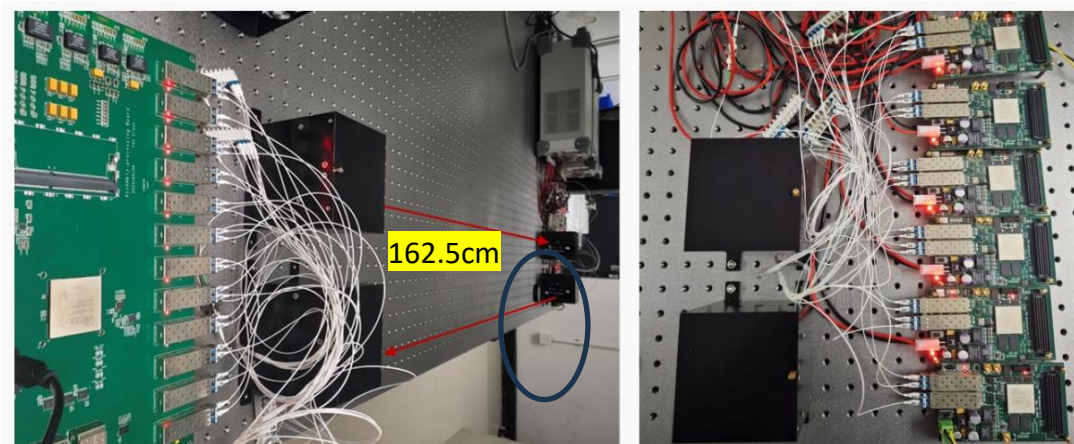


单通道回环测试



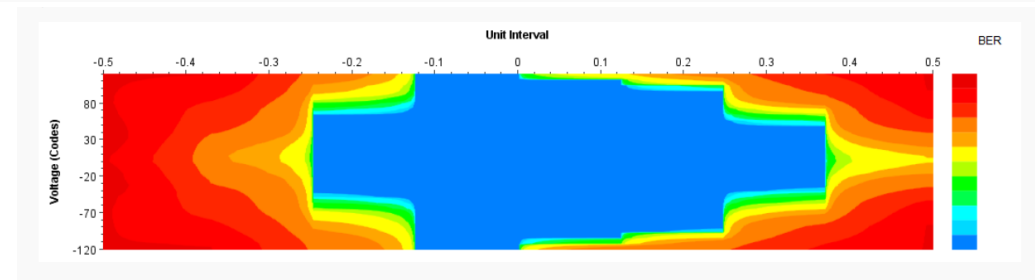
接收光功率：  
-13.36dBm

# 无线光传输研究



多通道光传输PRBS回环测试

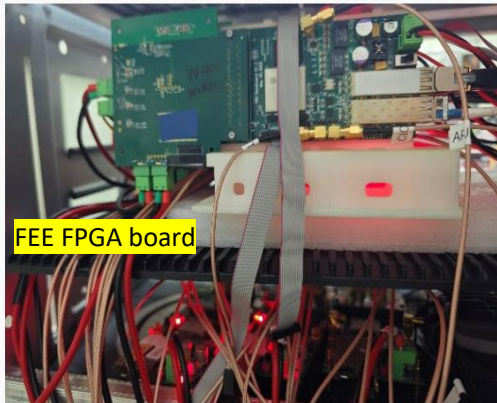
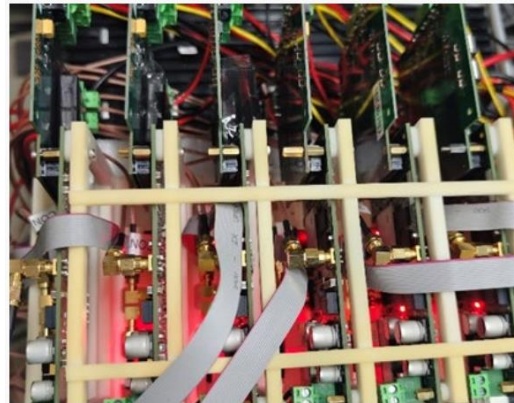
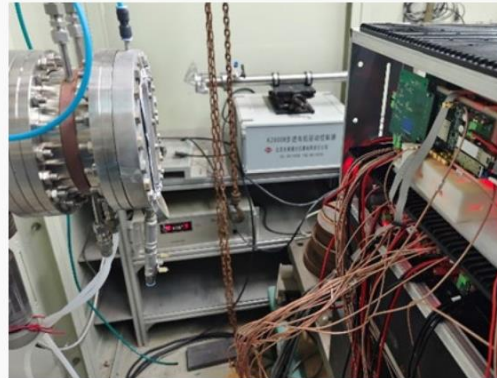
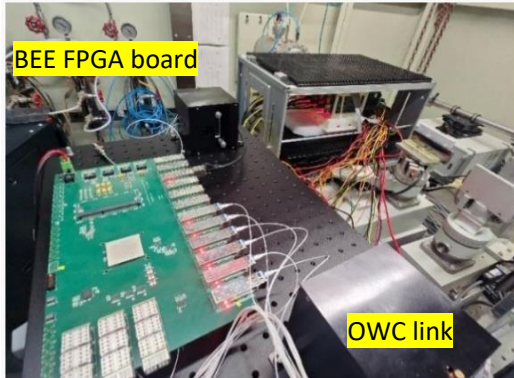
| Name                | TX                                  | RX                                  | Status      | Bits    | Errors  | BER      | BERT Reset | TX Pattern  |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|---------|---------|----------|------------|-------------|
| Ungrouped Links (0) |                                     |                                     |             |         |         |          |            |             |
| Found Links (12)    |                                     |                                     |             |         |         |          | Reset      | PRBS 31-bit |
| 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 |



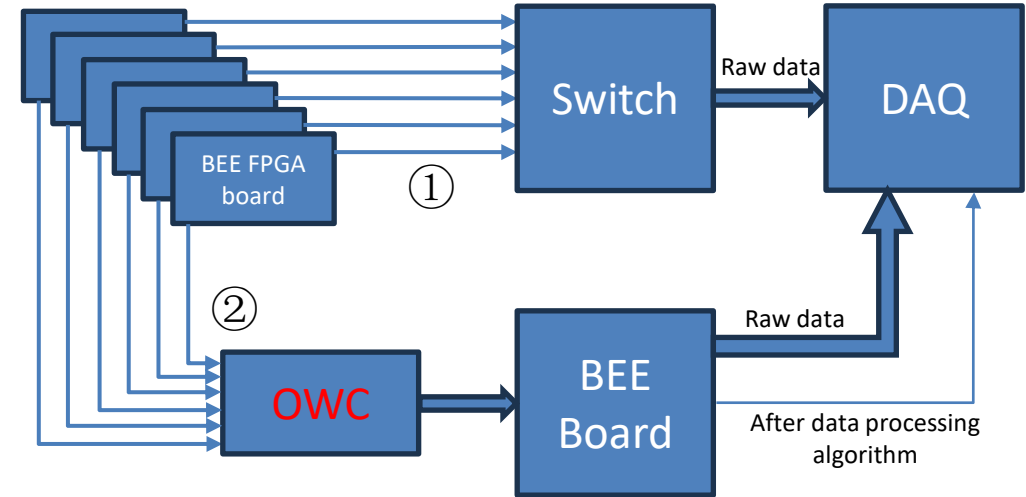
10Gbps 回环测试误码及眼图

- 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。
  - 已经实现了超过**100Gbps**的无线传输系统。

# 无线光传输研究



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。

- 搭建的短距离大数据带宽的光传输小模型平台，并得到了比较充分完整的验证。
- 应用到探测器内有困难，主要在于与探测器信号敏感区的冲突。

# 经费，会议报告，文章

## ■ 经费

- MOST3课题2,
- 高能所所创新支持120万
- 河南科学院基金支持145万

## ■ 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/>, Wireless studies in China
- 今年投稿TWEPP会议

## ■ 文章

- Multi-Channel Data and Clock Transmission System Based on Free-Space Optical Communication, JINST, 审稿中