



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

# 2025年8-12月考核报告

报告人：赵钱缘

导师：赵京周

专业：核技术及应用

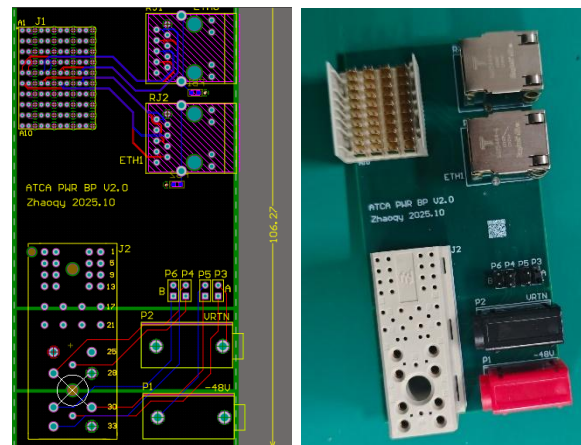
2025. 12. 25

## CMS RPC Phase II upgrade

- 采样步长量化对 RPC 时间分辨率影响 (仿真研究)
- DAQ 数据分析脚本扩展 (iRPC)
- RPC Emulator搭建—控制链路测试成功
- IBERT误码率测试
- VCU118单板调试
  - I2bus慢控验证
  - 基于phy芯片+sitcp实现千兆数据读出

## 其它工作

- ATCA供电子板绘制焊接
- 清点触发核心板和快控制主板器件
- 和师兄一起对MFT做测试
- 对宇宙线、时间分辨率测量方式、CMS探测器、RPC Slow Control, RPC endcap 模拟的相关论文阅读调研学习

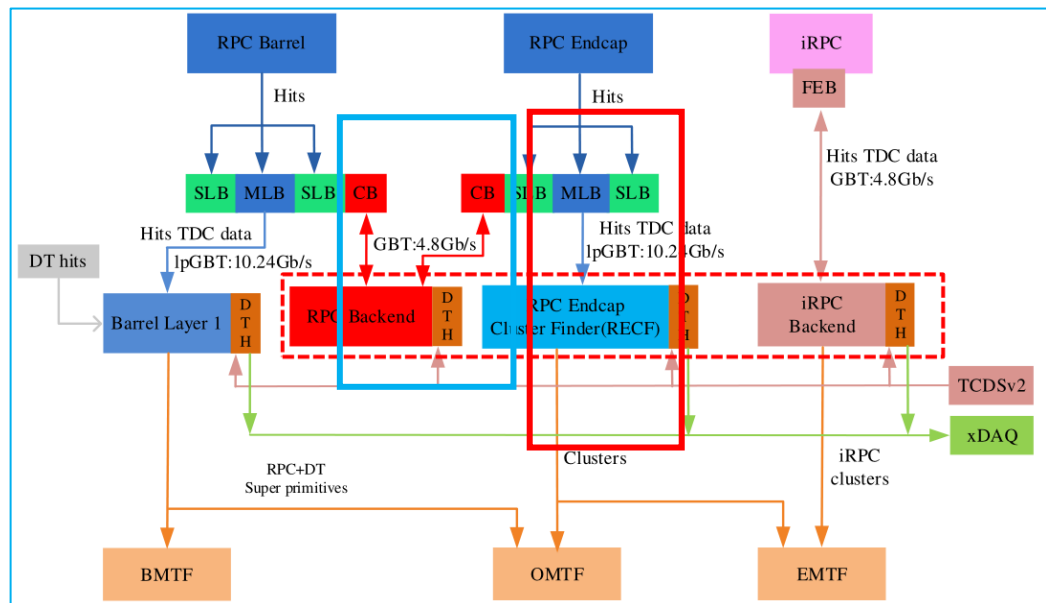


## CMS RPC 后端电子学 升级背景与需求

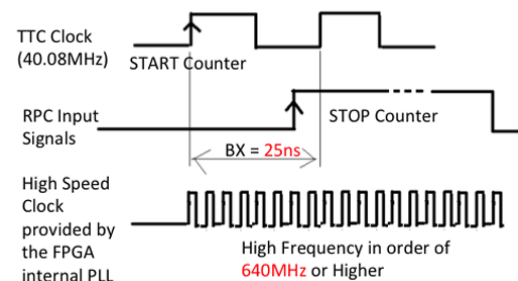
- HL-LHC 高亮度运行
- 面临更高的本底事例率且需要获取更精细的击中信息
- 对 RPC 后端读出与触发提出更高要求
  - 时间精度提升, 事例率和本底增加
  - 需要更高数据吞吐与实时处理能力
  - 对数据传输链路的抗辐照要求

## 目标:

- 需要重新设计更换FEE和EMTF到后端电子学的link system
- 阶段工作聚焦: 当前工作聚焦于 RPC Phase-2 后端电子学链路验证 + DAQ/慢控 Emulator 系统搭建
- 为后续与前端电子学、EMTF 的系统级联调 打下基础



CMS 二期升级 Muon 探测器的触发系统结构



计划改进采样率 (25ns->1.56ns)

# 采样步长量化对 RPC 时间分辨率影响 (仿真研究)



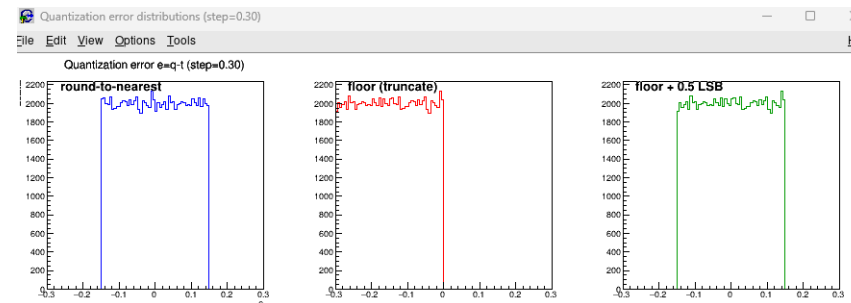
- RPC 升级计划将读出采样粒度从 25 ns 提升到 1.56 ns (更细步长)  
需要定量评估: TDC/采样步长的量化误差对探测器时间测量的影响

## 仿真方法

- 使用 ROOT(TRandom3::Gaus) 生成  $N = 100000$  个随机时间样本:

$t_{\text{true}} \sim \mathcal{N}(\mu = t_1, \sigma = \sigma_{\text{det}})$  其中  $\sigma_{\text{det}}$  表征探测器本征时间分辨率 (高斯抖动)

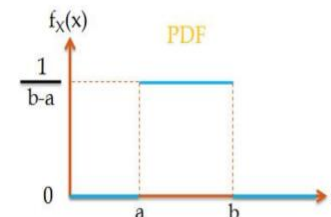
- 对原始数据引入采样/量化: 设置不同的步长  $\Delta$ , 分别用就近取整、向下取整 (floor)、下取整后加半个 LSB (floor+0.5LSB) 三种方式量化
- 对量化后的分布直接计算 StdDev(RMS), 并与模型预测对比;
- 调整  $\mu$  值和  $\delta$  值, 并重复多次实验



Example: Uniform distribution:  $U(a, b)$

$$\mu = \int x f(x) dx = \frac{b+a}{2}$$

$$\sigma^2 = \int (x - \mu)^2 f(x) dx = \frac{(b-a)^2}{12}$$



## 结论

- 步长量化可等效为引入一个均匀分布的量化噪声  
目前由向下取整方式所引入的系统误差为半步长区间
- 对分辨率的贡献  $\sigma_{\text{tdc}}^2 = \frac{\text{step}^2}{12}$ ,
- 总时间分辨率为  $\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{tdc}}^2 + \sigma_{\text{intrinsic}}^2$

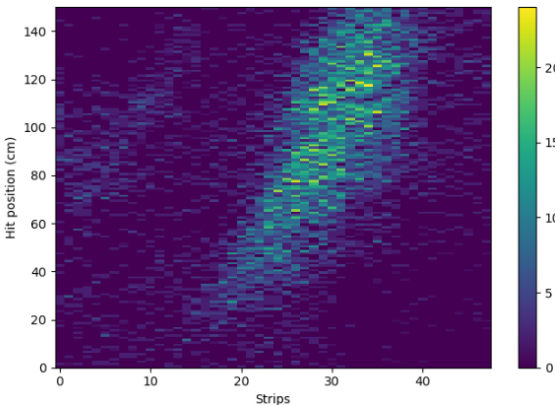
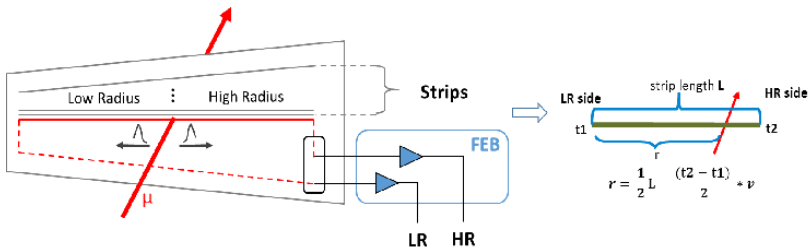
```
Processing tdc_round_vs_floor.cxx...
mu=15080.000000, sigma_true=1.500000, N=100000
Columns: step | method | bias | err_RMS | q_std | pred_q | std(round/center)
[step=3.125000] round : bias=0.003698 errRMS=0.906831 q_std=1.775830 pred=1.750372
[step=3.125000] floor : bias=-1.566302 errRMS=0.898400 q_std=1.728401 pred=--
[step=3.125000] center : bias=-0.003802 errRMS=0.898400 q_std=1.728401 pred=1.750372
[step=1.560000] round : bias=-0.000964 errRMS=0.451359 q_std=1.568579 pred=1.566142
[step=1.560000] floor : bias=-0.780418 errRMS=0.449508 q_std=1.565910 pred=--
[step=1.560000] center : bias=-0.000418 errRMS=0.449508 q_std=1.566148 pred=1.566142
[step=0.781200] round : bias=-0.000243 errRMS=0.225369 q_std=1.520659 pred=1.516857
[step=0.781200] floor : bias=-0.390288 errRMS=0.225531 q_std=1.517839 pred=--
[step=0.781200] center : bias=0.000312 errRMS=0.225531 q_std=1.517782 pred=1.516857
```

```
Processing tdc_round_vs_floor.cxx...
mu=1.508000, sigma_true=0.200000, N=100000
Columns: step | method | bias | err_RMS | q_std | pred_q | std(round/center)
[step=0.600000] round : bias=0.000979 errRMS=0.184476 q_std=0.303012 pred=0.264575
[step=0.600000] floor : bias=-0.301949 errRMS=0.161162 q_std=0.219540 pred=--
[step=0.600000] center : bias=-0.001949 errRMS=0.161162 q_std=0.219540 pred=0.264575
[step=0.300000] round : bias=0.000655 errRMS=0.086576 q_std=0.218562 pred=0.217945
[step=0.300000] floor : bias=-0.150485 errRMS=0.086628 q_std=0.217966 pred=--
[step=0.300000] center : bias=-0.000485 errRMS=0.086628 q_std=0.217966 pred=0.217945
[step=0.150000] round : bias=-0.000043 errRMS=0.043299 q_std=0.204663 pred=0.204634
[step=0.150000] floor : bias=-0.074915 errRMS=0.043304 q_std=0.204975 pred=--
[step=0.150000] center : bias=0.000085 errRMS=0.043304 q_std=0.204975 pred=0.204634
```

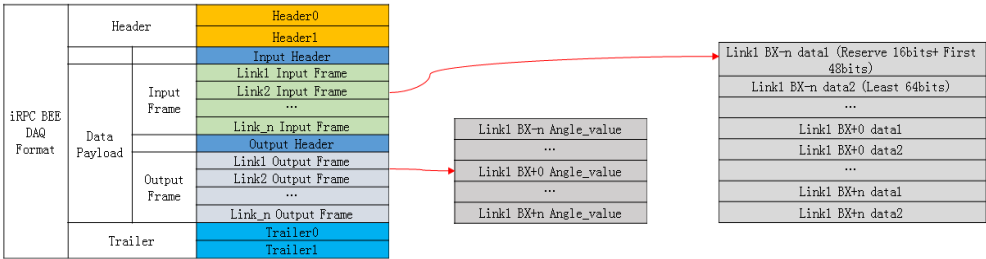
扩展改进iRPC 数据分析脚本（基于高能所ink平台python 3.12 with root kernel）

对iRPC后端电子学抓包得到的DAQ数  
据进行分析

- 功能：
- 解包记录每个 Event 的 Trigger / Orbit number 等，返回击中信息
  - 给乱序/丢包/无trailer做检查
  - 对于解析得到的hit info重建出二维击中图，取数窗口内每BX击中分布，各strip击中数分布图



二维击中图



|                    | Byte 7 | Byte 6 | Byte 5 | Byte 4 | Byte 3 | Byte 2 | Byte 1 | Byte 0 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Header0            | 63     | 62     | 61     | 60     | 59     | 58     | 57     | 56     |
| Header1            | 55     | 54     | 53     | 52     | 51     | 50     | 49     | 48     |
| Input Link Header  | 47     | 46     | 45     | 44     | 43     | 42     | 41     | 40     |
| Output Link Header | 39     | 38     | 37     | 36     | 35     | 34     | 33     | 32     |
| Input Link Data    | 31     | 30     | 29     | 28     | 27     | 26     | 25     | 24     |
| Output Link Data   | 23     | 22     | 21     | 20     | 19     | 18     | 17     | 16     |
| Trailer0           | 15     | 14     | 13     | 12     | 11     | 10     | 9      | 8      |
| Trailer1           | 7      | 6      | 5      | 4      | 3      | 2      | 1      | 0      |

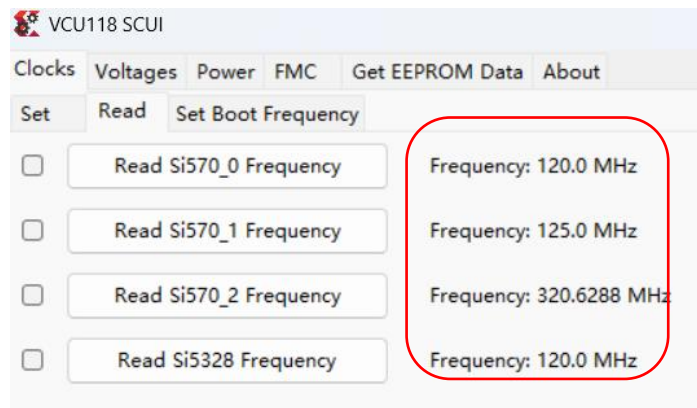
  

| Header0            | Special Mark ("PA" "DEADDEED")           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Trigger Number   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------|------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Header1            | Orbit Number                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Event Length     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Input Link Header  | LinkType("PA")                           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Link Length (7b) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Output Link Header | Link Type ("FFFF")                       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Link Length (6b) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Input Link Data    | Uplink frame between the FEB and the BEE |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |                  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Output Link Data   | 1st cluster Theta(R value)               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1st cluster Phi  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Trailer0           | FSM Error                                |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | Link Error       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Trailer1           | Board_ID                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | CRC-32           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

- 不足之处：
- 缺少触发信息解析部分
  - 存入root的信息框架还需设计完善
  - 目前hit position的横坐标仍然是strip号还没有还原为准确位置，需要探测器物理参数



# IBERT误码率测试



- 通过scui图形化界面配置所需时钟
- 对VCU118板卡做了多种速率下QSFP单板回环的IBERT测试

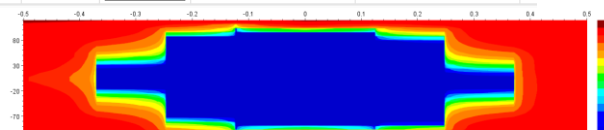
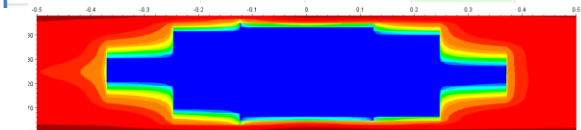
眼图张开度良好，链路误码数为0



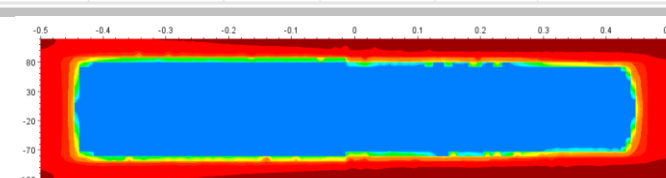
QSFP1: 在320.6288MHz下跑10.26G线速率-lpGBT数据传输链路

QSFP2: 在125MHz下跑1G-sitcp DAQ链路

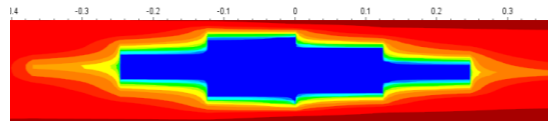
| Name                | TX           | RX           | Status      | Bits     | Errors | BER       | BERT Re... | TX Pattern | RX Pattern | T |
|---------------------|--------------|--------------|-------------|----------|--------|-----------|------------|------------|------------|---|
| Ungrouped Links (0) |              |              |             |          |        |           |            |            |            |   |
| Found Links (4)     |              |              |             |          |        |           |            |            |            |   |
| Found 0             | MGT_X1Y48/TX | MGT_X1Y48/RX | 10.260 Gbps | 3.067E13 | 0E0    | 3.261E-14 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Found 1             | MGT_X1Y49/TX | MGT_X1Y49/RX | 10.257 Gbps | 3.067E13 | 0E0    | 3.261E-14 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Found 2             | MGT_X1Y50/TX | MGT_X1Y50/RX | 10.260 Gbps | 3.067E13 | 0E0    | 3.261E-14 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Found 3             | MGT_X1Y51/TX | MGT_X1Y51/RX | 10.260 Gbps | 3.067E13 | 0E0    | 3.261E-14 | Reset      | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |



|                  |              |              |            |          |     |           |       |            |            |   |
|------------------|--------------|--------------|------------|----------|-----|-----------|-------|------------|------------|---|
| Link Group 1 (4) |              |              |            |          |     |           |       |            |            |   |
| Link 4           | MGT_X1Y52/TX | MGT_X1Y52/RX | 1.000 Gbps | 3.827E13 | 0E0 | 2.613E-14 | Reset | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Link 5           | MGT_X1Y53/TX | MGT_X1Y53/RX | 0.999 Gbps | 3.83E13  | 0E0 | 2.611E-14 | Reset | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Link 6           | MGT_X1Y54/TX | MGT_X1Y54/RX | 1.000 Gbps | 3.83E13  | 0E0 | 2.611E-14 | Reset | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |
| Link 7           | MGT_X1Y55/TX | MGT_X1Y55/RX | 1.000 Gbps | 3.828E13 | 0E0 | 2.612E-14 | Reset | PRBS 7-bit | PRBS 7-bit | 0 |

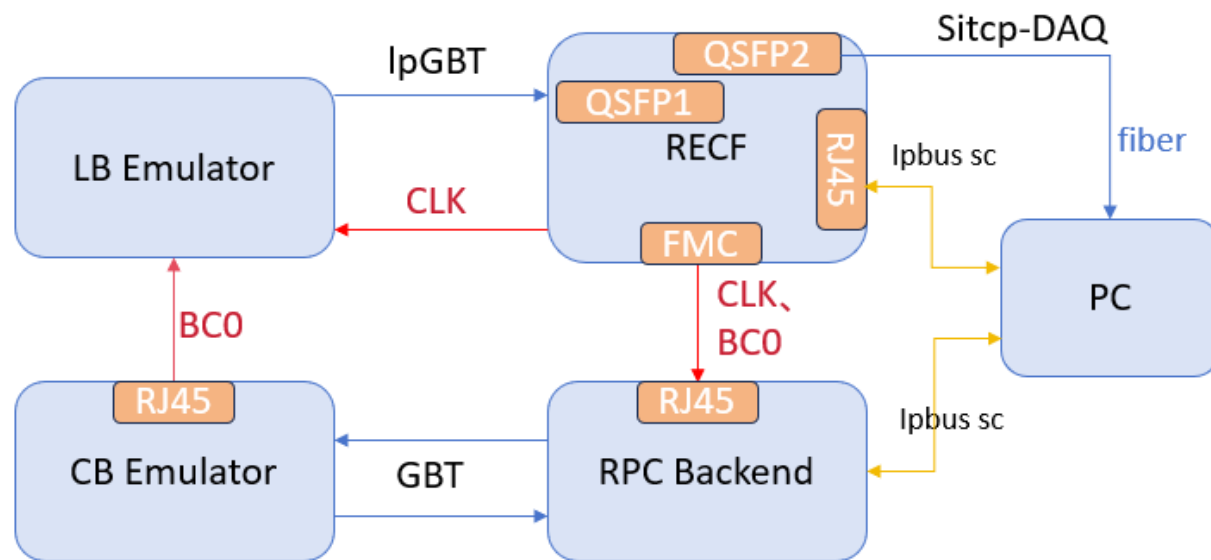


| Name            | TX           | RX           | Status      | Bits     | Errors | BER       | BERT Reset |
|-----------------|--------------|--------------|-------------|----------|--------|-----------|------------|
| Found Links (4) |              |              |             |          |        |           |            |
| Found 2         | MGT_X1Y56/TX | MGT_X1Y56/RX | 28.125 Gbps | 3.208E14 | 0E0    | 3.118E-15 | Reset      |
| Found 3         | MGT_X1Y57/TX | MGT_X1Y57/RX | 28.125 Gbps | 3.208E14 | 0E0    | 3.118E-15 | Reset      |
| Found 4         | MGT_X1Y58/TX | MGT_X1Y58/RX | 28.125 Gbps | 3.208E14 | 0E0    | 3.118E-15 | Reset      |
| Found 5         | MGT_X1Y59/TX | MGT_X1Y59/RX | 28.099 Gbps | 3.208E14 | 0E0    | 3.118E-15 | Reset      |

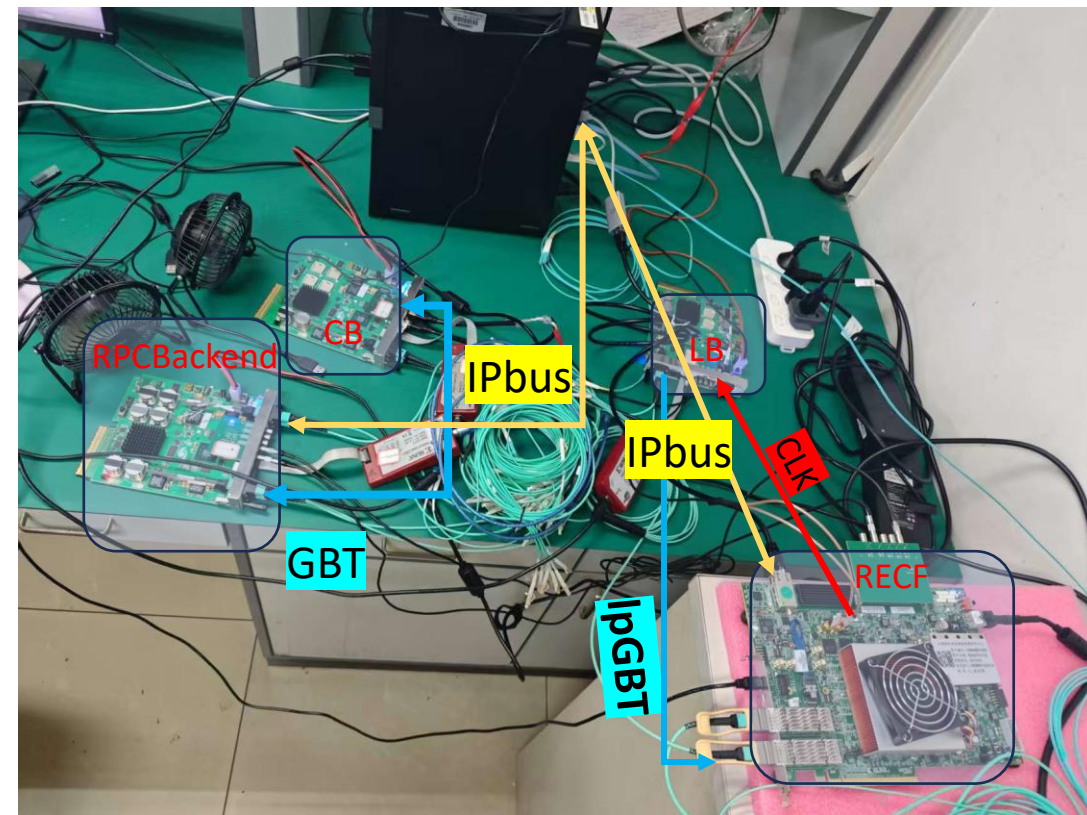


Firefly loopback: 在156.25MHz下跑28.125G

# RPC Emulator搭建



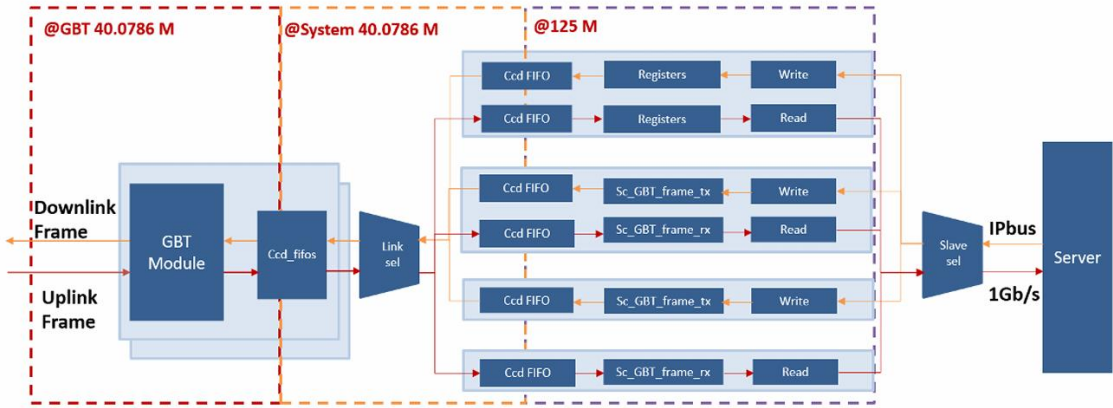
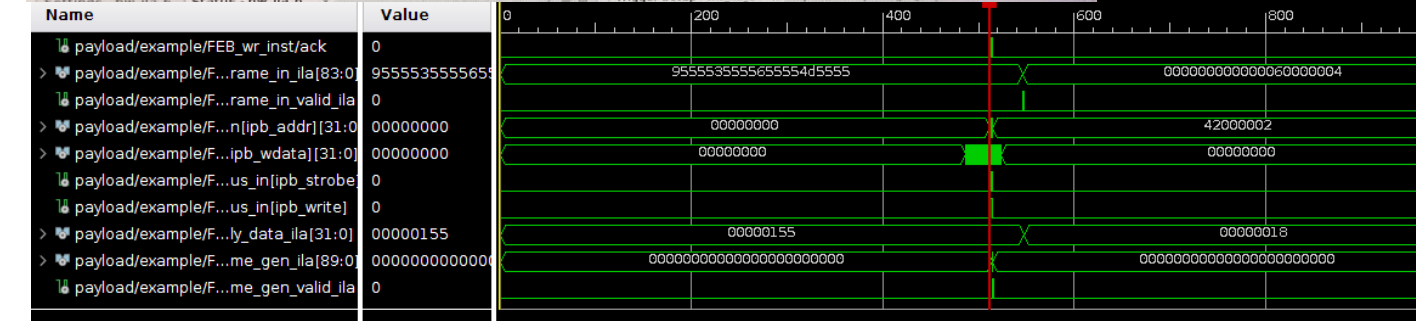
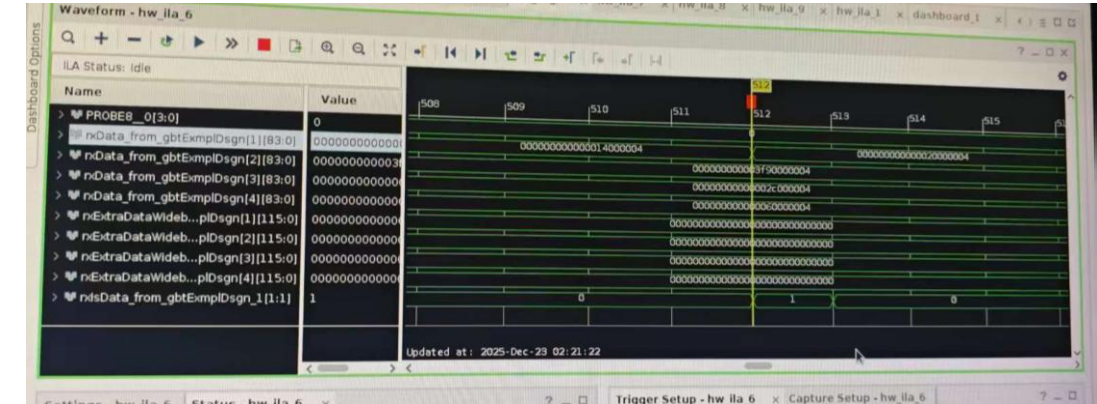
- 在真实前端电子学尚未接入的情况下，搭建了一套 **后端 Emulator 系统**，为后续联调工作做准备。
- 系统包括：基于CPPF板卡的V7FPGA实现的LB Emulator和CB Emulator以及RPC Backend，基于VCU118开发板的VU9PFPGA实现的RECF。





|                                           |                    | 最高0b未发往gbt模块，在内部处理 |                 |                       |             | 快控信号4b    |                    | 慢控80b       |               |                         |                          |                       |                     |             |           |                 |             |        |    |
|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-------------|-----------|--------------------|-------------|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|--------|----|
|                                           |                    | [89]               | [89, 84]-6b     | [83, 80]-4b           | [79, 78]-2b | [77]-1b   | [76, 72]-5b        | [71, 70]-2b | [69, 49]-21b  | [48, 45]-4b             | [44, 5]-40b              |                       |                     |             | [4, 2]-3b |                 | [1, 0]-2b   |        |    |
|                                           | scframe<br>[89, 0] | broadcast enable   | 链路地址<br>link_ap | 快控信号<br>Fast Commands | RSVD        | CB/LE     | OPCODE             | RSVD        | packet length | LB Addr                 | 40b payload              |                       |                     |             | CMD       | RSVD            |             |        |    |
| 读取和写入<br>CB/LE<br>参数                      | CB_LE_wr           | 001                | 000011(3)       | x000                  | 00          | 1/0       | 00001              | 00          | 21"x"         | 4b Link Board num       | 4b Mux sel<br>[44, 41]   | 3b ADC ch<br>[40, 38] | 33b payload [37, 5] |             | 001(A)    | 00              |             |        |    |
| 读取和配置<br>FEB<br>参数                        | feb                | 010                | 000001(1)       | x000                  | 00          | 1/0       | 00010              | 00          | 21"x"         | 3b operation            | 3b DE                    | 1b DE_port            | 2b FEB              | 1b Chip     | 3b Ch     | 10b ADC/DAC Val | 21b payload | 001(A) | 00 |
| 读图件ID                                     | fvid               | 011                | 000010(2)       | x000                  | 00          | 1/0       | 00011              | 00          | 21"x"         | 4b Link Board num       | 40b                      |                       |                     |             | 001(A)    | 00              |             |        |    |
| CB/LE远<br>程编程                             | rp_v               | 100                | 000100(4)       | x000                  | 00          | 1/0       | 00100              | 00          | 21"x"         | 4b Link Board num       | 40b                      |                       |                     |             | 011(C)    | 00              |             |        |    |
| 读取<br>CB/LE 诊<br>断信息                      | Diag               | 101                | 000100(4)       | x000                  | 00          | 1/0       | 00010              | 00          | 21"x"         | 4b Link Board num       | 4b Diag_type<br>[44, 41] | 36b 四种功能由diag_type做选择 |                     |             |           | 001(E)          | 00          |        |    |
| LE相位调<br>整                                | Phase              | 110                | 000010(2)       | x000                  | 00          | 1         | 00101              | 00          | 21"x"         | 4b Link Board num       | 1b pos/neg               | 10b Shift Value       |                     | 29b payload | 001(E)    | 00              |             |        |    |
| 目前可选4路，未来要拓展成发往56路CB，将111111作为broadcast标志 |                    |                    |                 | 其中最高位b0做同步            |             | 0为CB，1为LE | 前端通过此opcode确认是何种命令 |             |               | 前面CB/LE选1时，这边选由CB发往哪个LE |                          |                       |                     |             |           |                 |             |        |    |

- 根据现有固件和论文还原的Ipbus 32add 32data 所对应的慢控命令（还需和前端电子学对接）



- 先在RPC Backend单板GBT链路用**光纤自回环**的模式下验证了和上位机的收发正常---**Ipbus链路能正常工作**，慢控信号能正常写入
- 搭建起Emulator后，RPC Backend需要与CB 通信，目前两端抓ila可以看到GBT模块收发正常，PC端读回正常，**控制链路已成功建立**

```
rpc_cb
ipbusudp-2.0://192.168.200.16:50001
-----link4-----
fwb_wr.test_node4 = 24
-----link1-----
fwb_wr.test_node = 8
fwb_wr.test_node = 7
fwb_wr.test_node = 6
fwb_wr.test_node = 5
-----link2-----
fwb_wr.test_node2 = 4
fwb_wr.test_node2 = 3
fwb_wr.test_node2 = 2
fwb_wr.test_node2 = 1
-----link3-----
fwb_wr.test_node3 = 14
fwb_wr.test_node3 = 13
fwb_wr.test_node3 = 12
fwb_wr.test_node3 = 11
-----link4-----
fwb_wr.test_node4 = 114
fwb_wr.test_node4 = 113
fwb_wr.test_node4 = 112
fwb_wr.test_node4 = 111
```



- emulator中IpGBT模块还未能正常通信
- 用慢控设置板上link\_info为两路  
fake\_data(板上自己产生的假数据源)

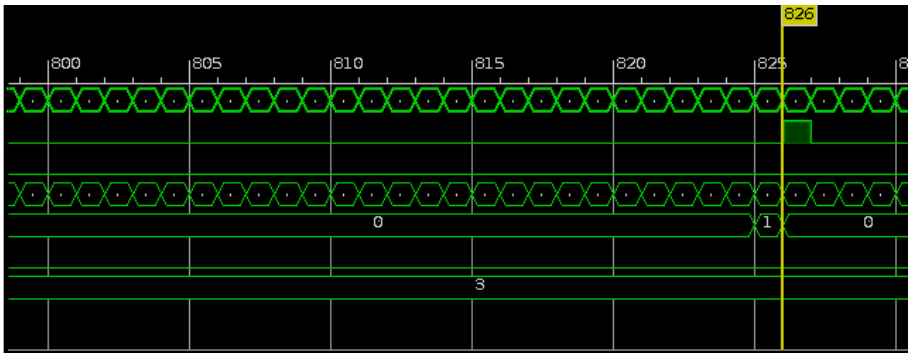
```

rpc_rect
ipbusudp-2.0://192.168.200.17:50001
recf_sc.rst_all = 1
recf_sc.rst_fifo = 0
recf_sc.rst_fifo = 1
recf_sc.rst_fifo = 0
recf_sc.recf_start = 1
recf_sc.cluster_enable = 1
recf_sc.timediff_demuxangle_rx = 23
recf_sc.L1A_latency = 3
recf_sc.link_sel_link1 = 0
recf_sc.link_sel_link2 = 0
recf_sc.self_trig_sel = 3
    
```

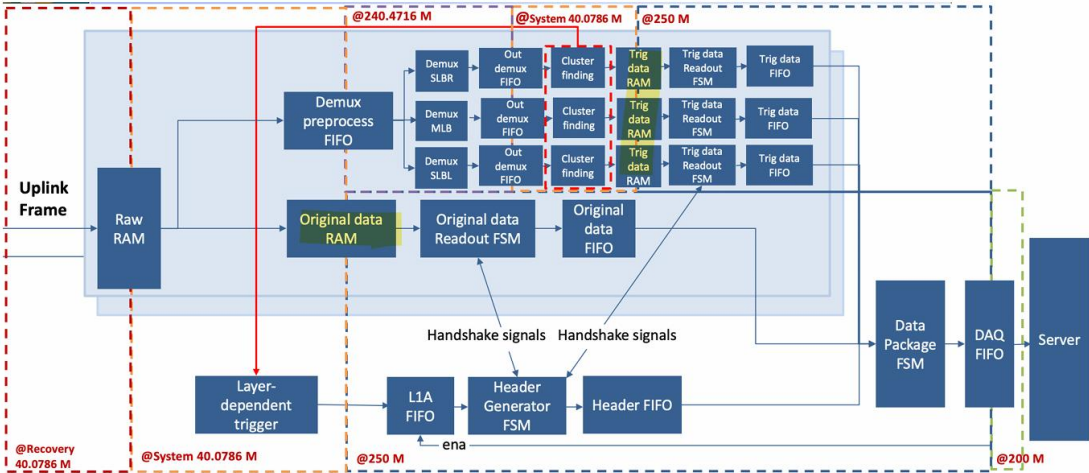
取数结果如下，  
 Sitcp模块工作正常

| Address  | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | a  | b  | c  | d  | e  | f  |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 00000000 | de | ad | be | ef | 00 | 40 | a5 | 42 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000010 | fa | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 | 00 |
| 00000020 | 00 | 01 | 27 | 80 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 00000030 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | a0 |
| 00000040 | 00 | 01 | 27 | c0 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 00000050 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | b0 |
| 00000060 | 00 | 01 | 28 | 00 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 00000070 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | c0 |
| 00000080 | 00 | 01 | 28 | 40 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 00000090 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | d0 |
| 000000a0 | 00 | 01 | 28 | 80 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 000000b0 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | e0 |
| 000000c0 | 00 | 01 | 28 | c0 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 000000d0 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 49 | f0 |
| 000000e0 | 00 | 01 | 29 | 00 | 3f | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff |
| 000000f0 | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | ff | 4a | 00 |

|                                         | Value                      |
|-----------------------------------------|----------------------------|
| t/L1a_gen/linkoriginaldata[2][229:0]    | 003fffffffffffffffffffffff |
| t/L1a_gen/L1a_pre                       | 1                          |
| t/L1a_gen/BEB_busy                      | 0                          |
| t/L1a_gen/bcn_count[11:0]               | 4bf                        |
| t/L1a_gen/anglevalue_valid_o_multi[1:1] | 0                          |
| t/L1a_gen/bc0_sig_ila                   | 0                          |
| t/L1a_gen/self_trig_sel_vio[1:0]        | 3                          |



|          |                    |                 |         |              |
|----------|--------------------|-----------------|---------|--------------|
| 8b RSVD  | 4b tdc info        | 4b              | 4b      | 12b          |
| 00000000 | sub BX<br>(1.56ns) | cluster<br>size | angle R | angle<br>phi |



- 熟悉RECF 整体数据流向
- 学习了DEMUX 与 cluster finding算法
- 板上BRAM资源利用率过高，后续开发多路IpGBT前需优化

图上触发模式为自触发-angle value，触发模块工作正常，后续需接入EMTF 的L1A

经过触发逻辑得到的trigger data

## 本季度工作总结

- ✓ 完成 GT ( QSFP / Firefly) 高速链路测试
- ✓ 学习 DEMUX 与 cluster finding 逻辑设计
- ✓ 数据读出脚本扩展与时间分辨率研究
- ✓ 搭建与调试RPC 后端电子学 Emulator
  - ✓ 实现GBT / IPbus 控制链路
  - ✓ Sitcp千兆数据读出



## 后续工作计划:

- 计划在明年三月初前往CERN进行系统联调
- 推进与 CMS Phase-2 前端电子学的整体对接
- 研究优化 BRAM / FIFO 与算法资源, 开发触发数据传输到EMTF的固件
- 基于RPC固件写一套对应的数据分析脚本
- DAQ从sitcp转换到slink, 整体固件后续需要移植到serenity板子上

感谢各位老师和同学!