

# DBPM信号处理器及软件

赵欢、冷用斌、赖龙伟、阎映炳\*

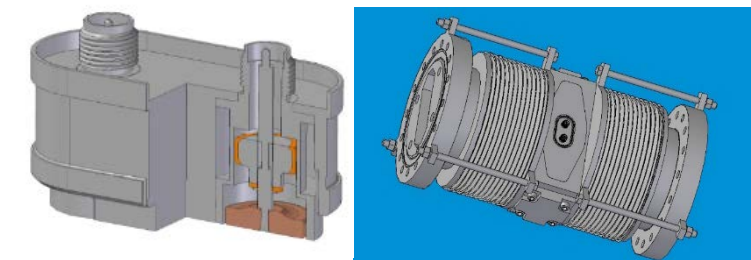
上海应用物理研究所 束测控制部



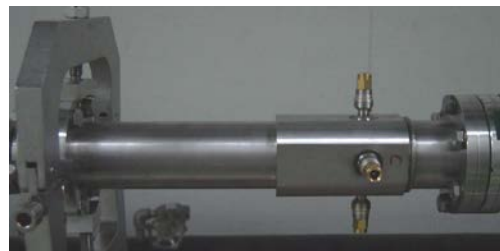
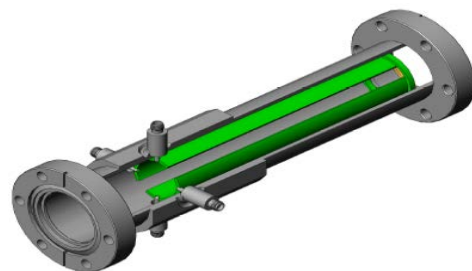
# 背景介绍



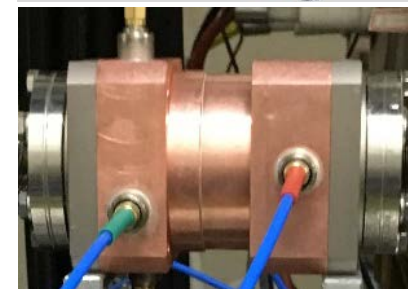
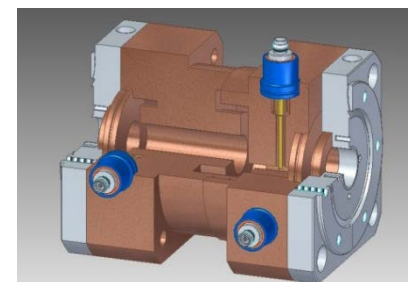
- **BPM系统**（**B**eam **P**osition **M**easurement）用于测量束流在真空管道中的横向位置，分布在加速器各关键节点
- **其他应用**： 工作点,  $\beta$ 函数, 色品, 色散, 相差, 轨道反馈
- **各种探头**



纽扣BPM



条带BPM

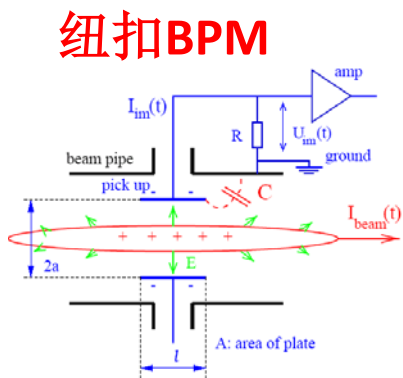


腔式BPM

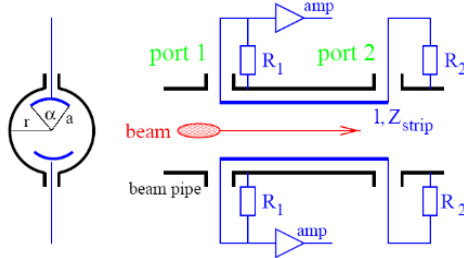
# BPM探头特性



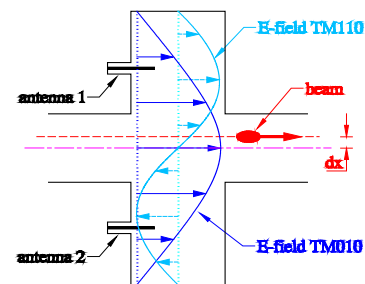
## 结构原理



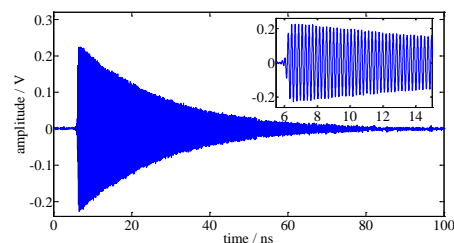
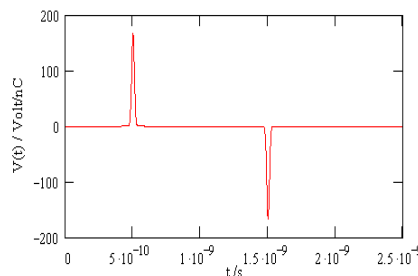
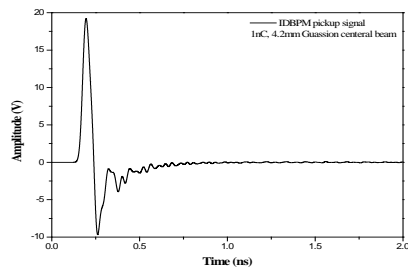
## 条带BPM



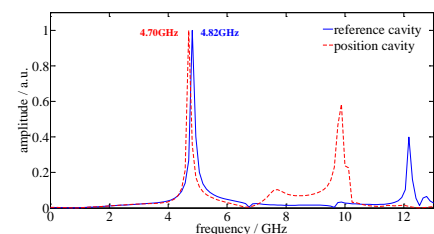
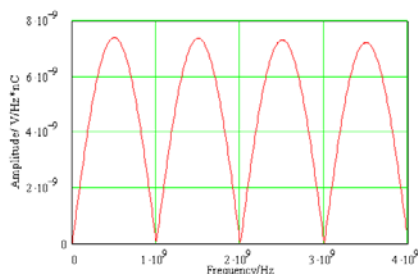
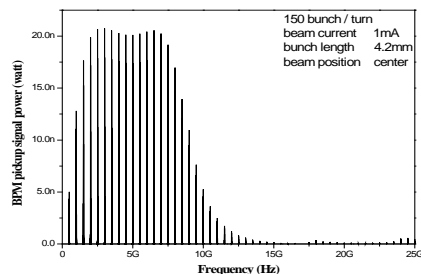
## 腔式BPM



## 时域信号



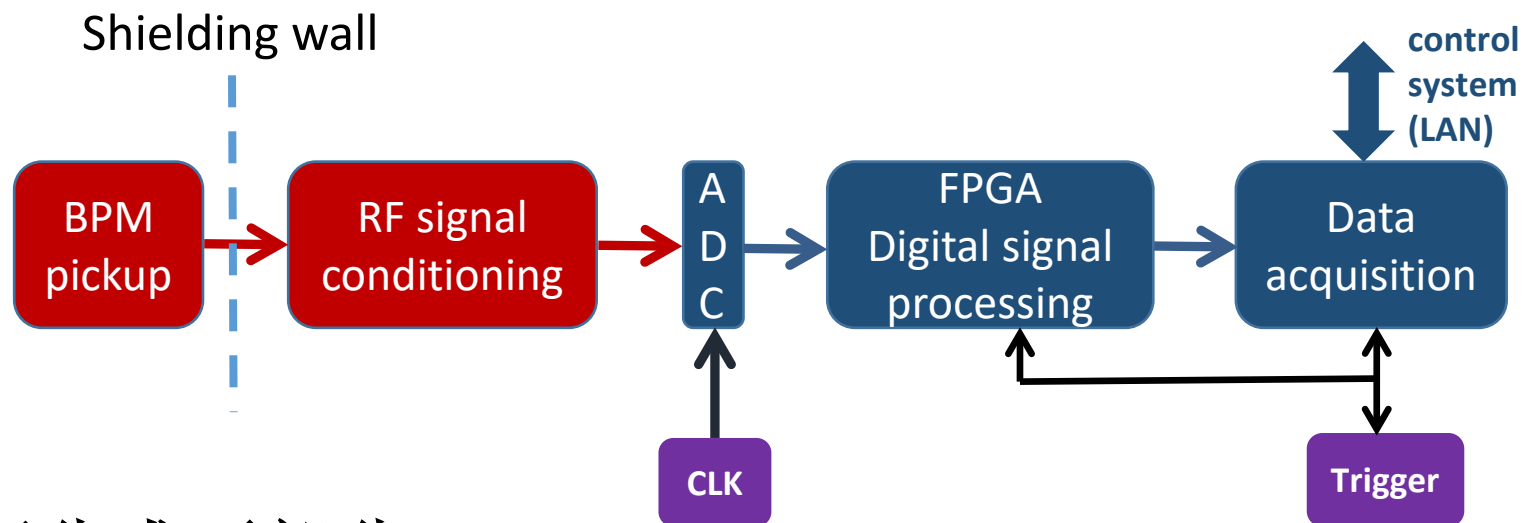
## 频域信号



静电感应  
信号小  
高通信号  
用于电子储存环

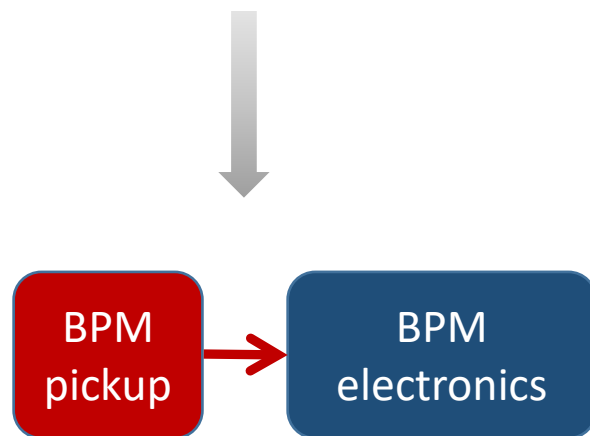
静电感应  
信号大，定向耦合  
宽带信号  
用于直线加速器

谐振腔，高阻抗  
信号强，nm分辨率  
窄带信号（分辨率高）  
用于FEL



BPM系统可分成两部分：

- **BPM探头**
- **信号处理电子学**
  - 射频信号调理
  - ADC数字化采样
  - 数字信号处理
  - 数据采集与控制系统
  - 外接时钟、触发等



# 上海光源储存环BPM系统



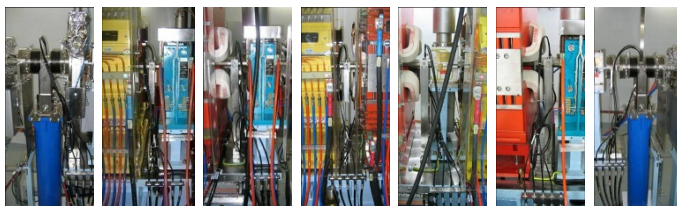
BPM processors  
Libera



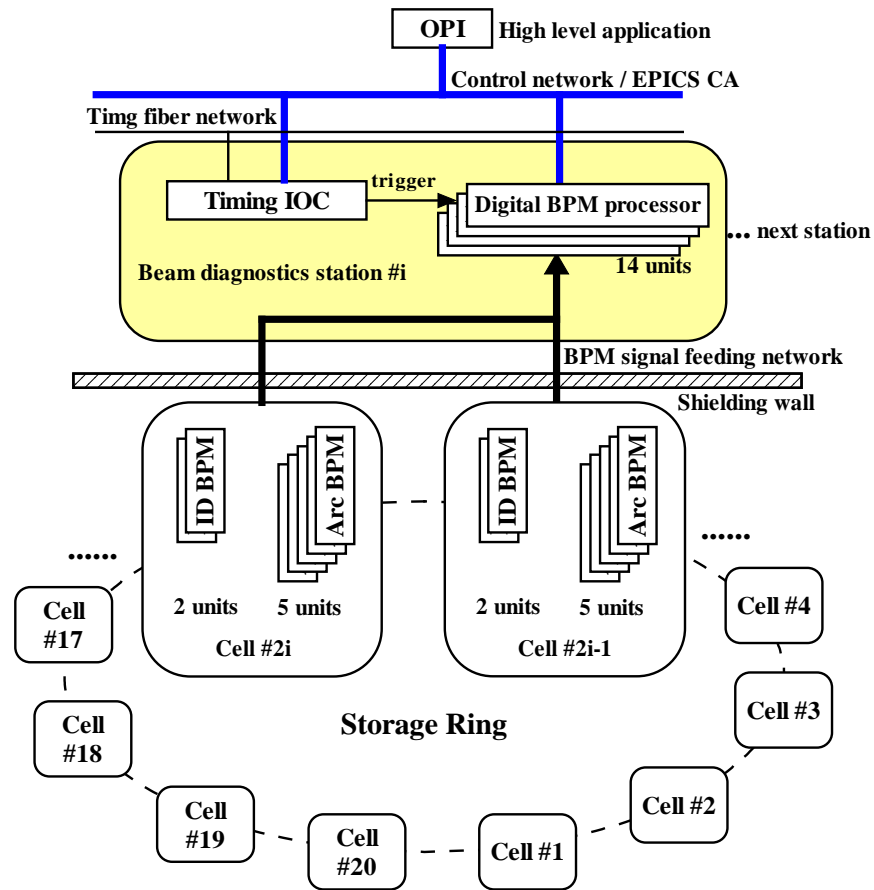
Cable panel  
Cable tray



2 IDBPMs  
& 5 ArcBPMs



Pickup assembly





## • 出发点

- **DBPM**信号处理器是加速器束测系统关键设备之一，数量多，投入高；
- 商业化产品限制（无法进行二次开发，维护成本高）
- 国际上其他实验室也在自行研制处理器
- 积累关键技术，提高自主知识产权水平
- **DCLS**，**SXFEL**，巴西直线工程需要

## • 条件

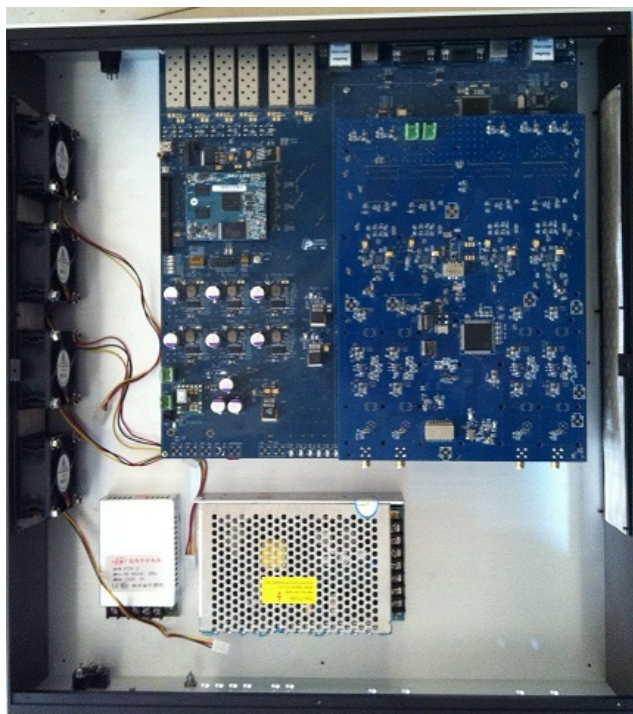
- 积累了多年**DBPM**使用经验
- 有软件开发技术人员储备

## • 目标

- 研制并工程应用于**DCLS**和**SXFEL**的**DBPM**信号处理器



# 上海光源储存环DBPM样机

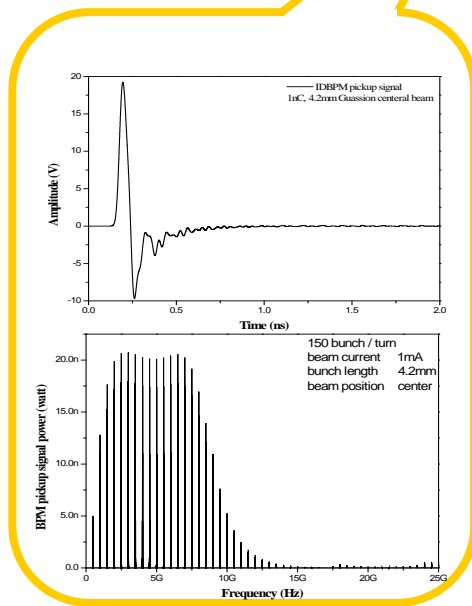
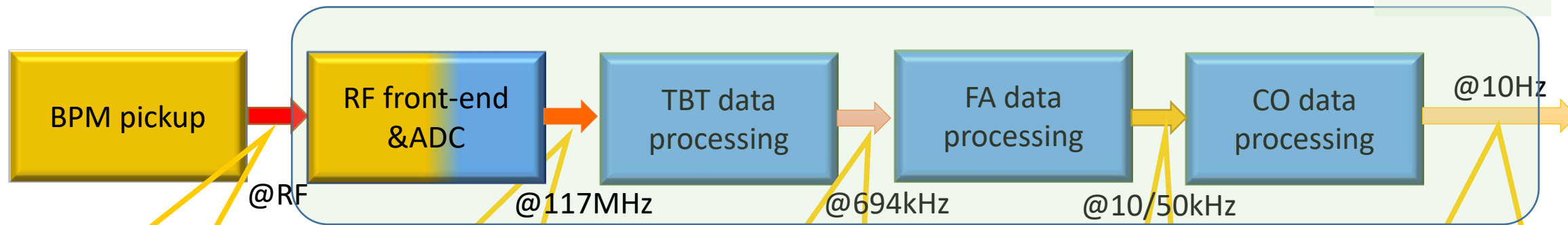




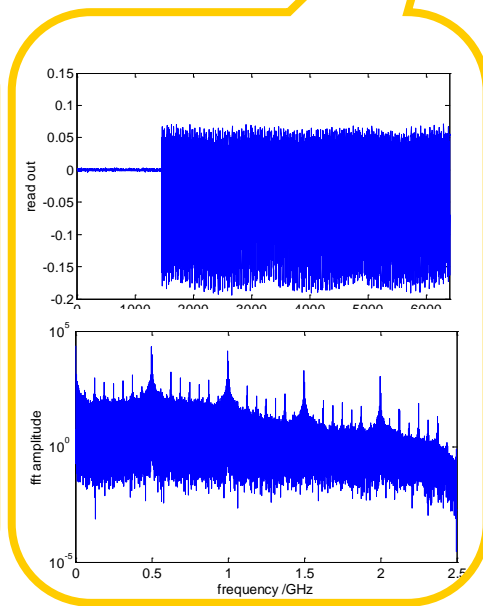
# SSRF DBPM样机研制：2012年研制成功



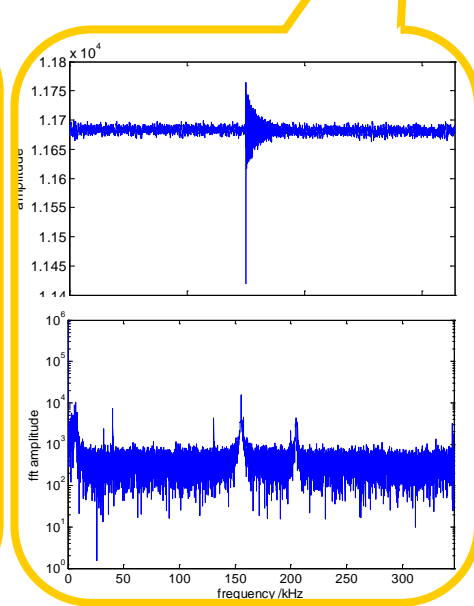
DBPM



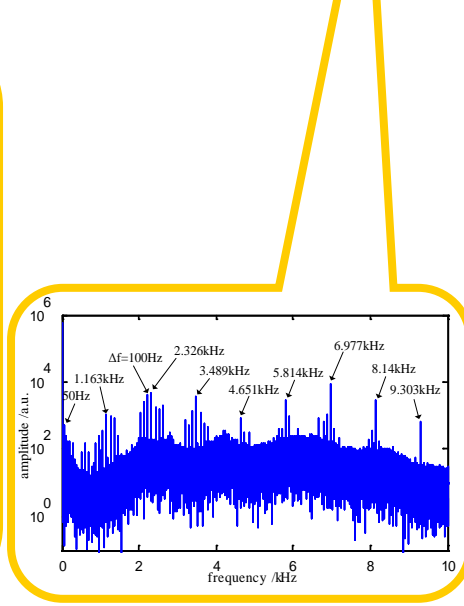
探头输出数据



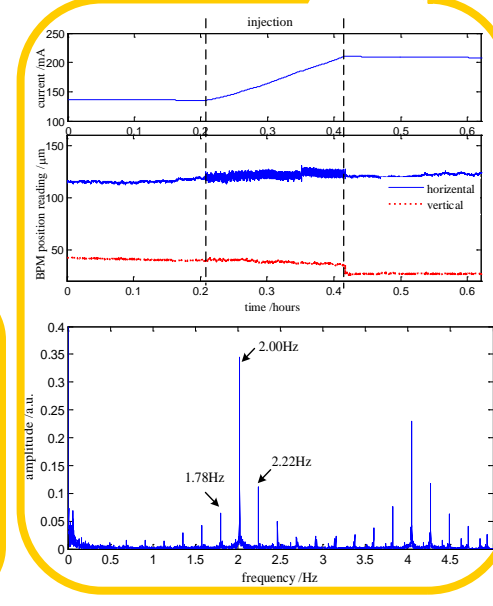
调理后采样数据



逐圈数据



快反馈数据



闭轨数据

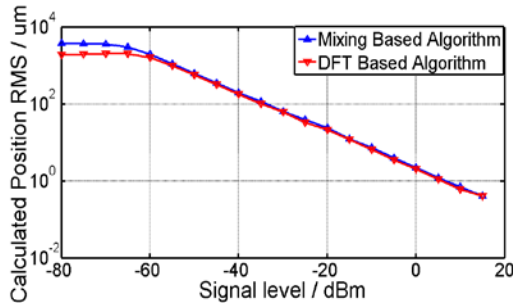
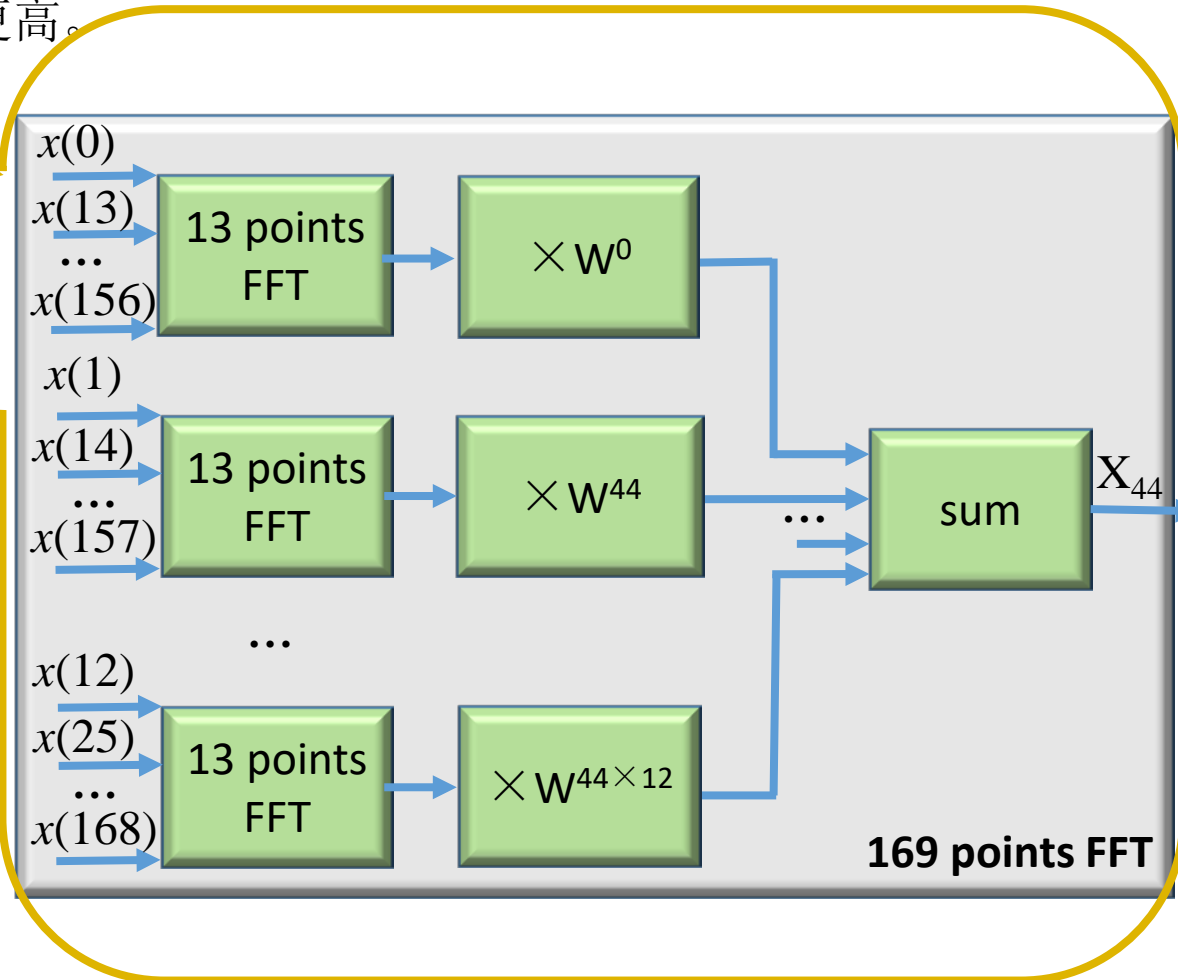
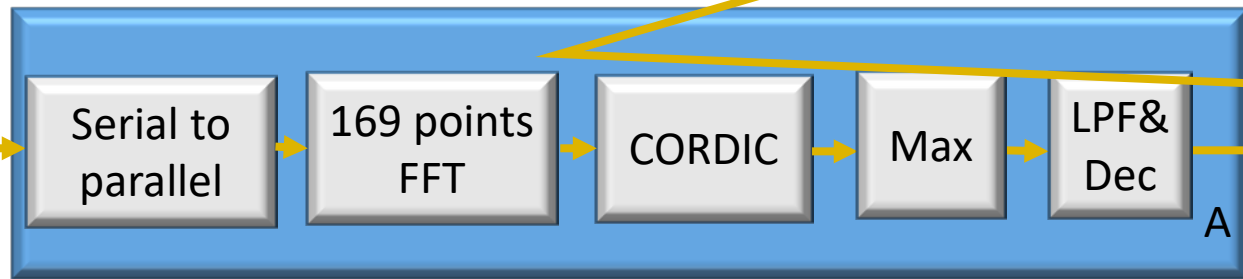


# SSRF DBPM样机--基于FFT的信号处理算法

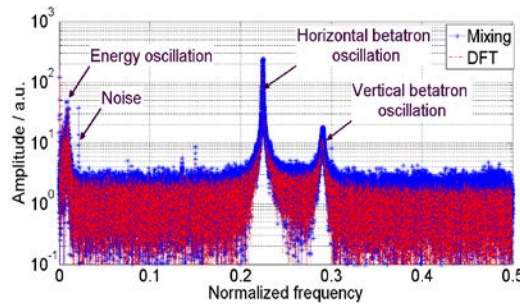
**原理:** 原始ADC数据的中心信号幅度由逐圈信号的调制决定, 通过检测中心信号幅度可获得束流逐圈信息。相较于数字下变频算法结构更简单, 滤波效果更好, 分辨率更高。

- 采样频率117.2799MHz, 即169倍回旋频率
- 采用Cooley-Tukey 算法计算169点DFT, 即计算13个13点DFT
- 因峰值位置固定, 只需计算第45点(中心信号)处DFT

$$X_{44} = X_{13 \times 3 + 5} = \sum_{n_1=0}^{12} W_{13}^{3n_1} [W^{5n_1} (\sum_{n_2=0}^{12} x_{n_1+13n_2} W_{13}^{5n_2})]$$



两种算法分辨率测试



注入期间两种算法频谱

# SSRF DBPM样机—四通道校准

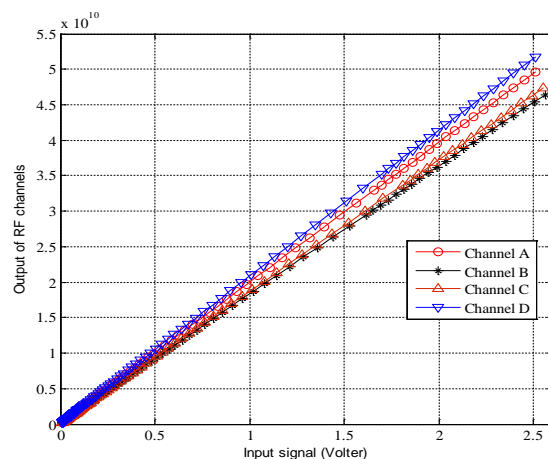
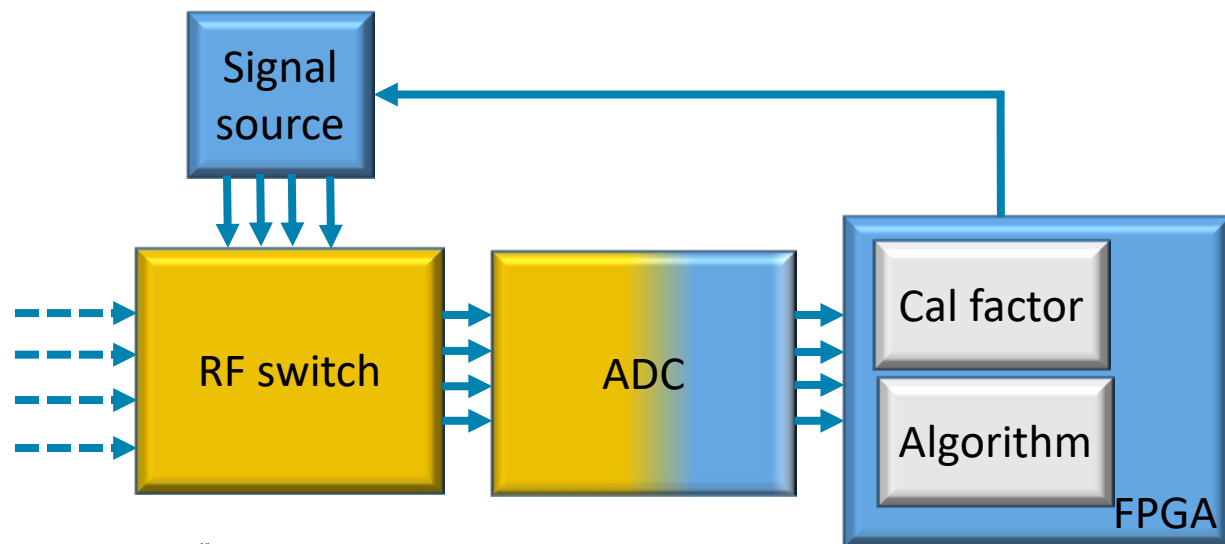
**起因：**四通道调理电路的不一致性影响DBPM系统测量精度，使流强依赖性更严重。解决该问题的一种方法是采用交联开关进行通道间切换，但会引入切换噪声，降低逐圈位置性能。

**原理：**利用标准信号源输出不同幅度信号，利用FPGA对每个通道在不同信号幅度时的输出信号通过校准函数进行拟合校准。不仅可修正通道不一致性，而且可修正零漂和非线性。

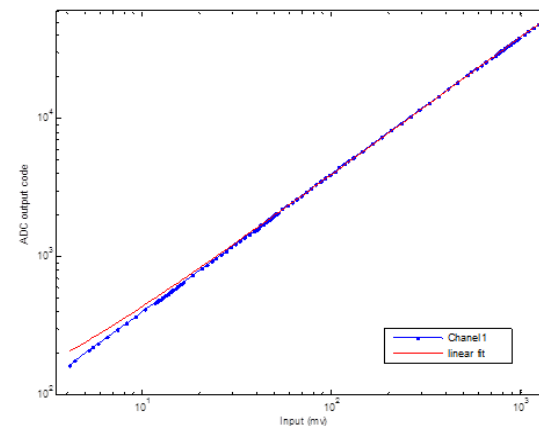
**本设计已获得发明专利授权。**

$$F(X) = \begin{cases} k_1 X + m_1, & x_0 \leq X \leq x_1 \\ k_2 X + m_2, & x_1 \leq X \leq x_2 \\ \dots & \dots \\ k_n X + m_n, & x_{n-1} \leq X \leq x_n \end{cases}$$

校准函数



ADC通道不一致性

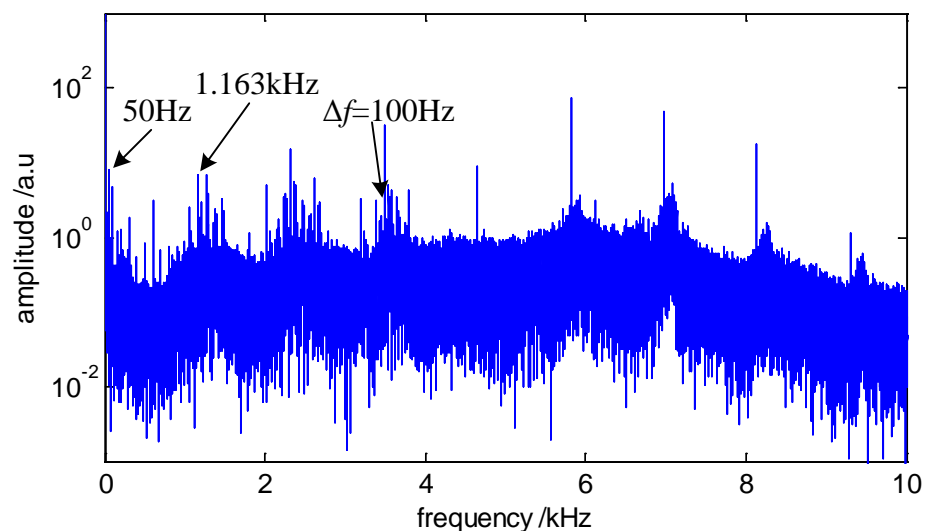


通道A线性拟合

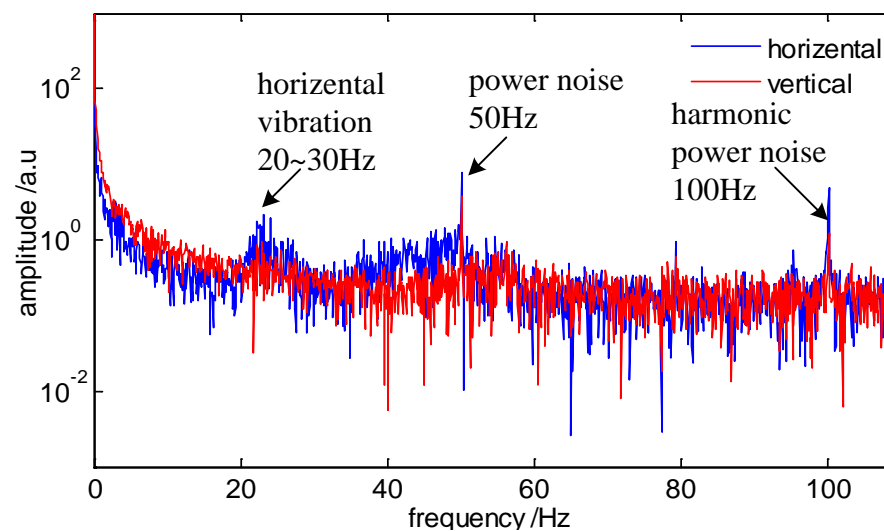
# SSRF DBPM样机--大容量50kHz位置数据



- 提供524288点50kHz速率、25kHz带宽FA数据
- 可对束流频谱进行精细分析，提供了有效研究手段
- 其他DBPM系统不具备该功能

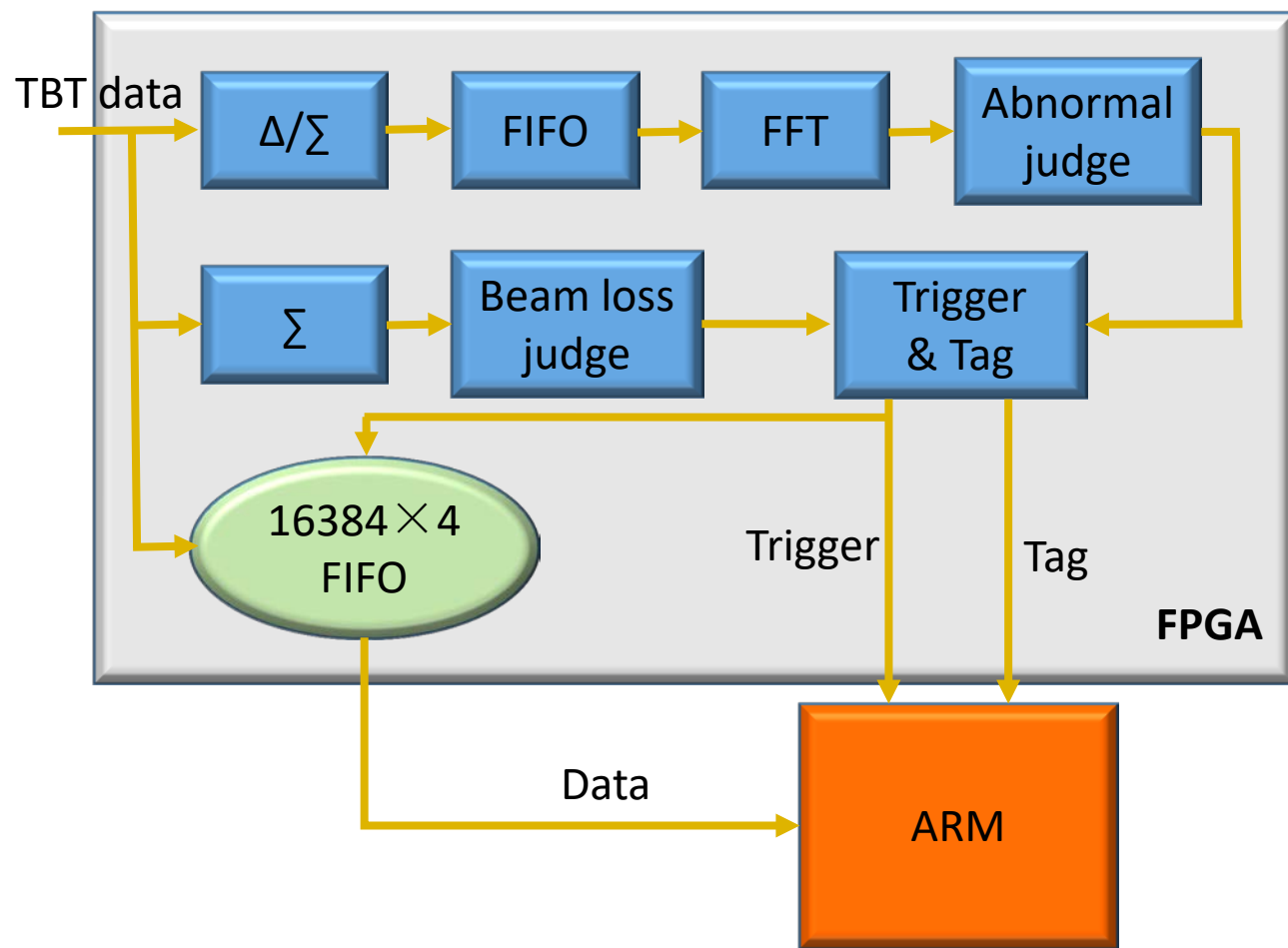


50kHz数据频谱



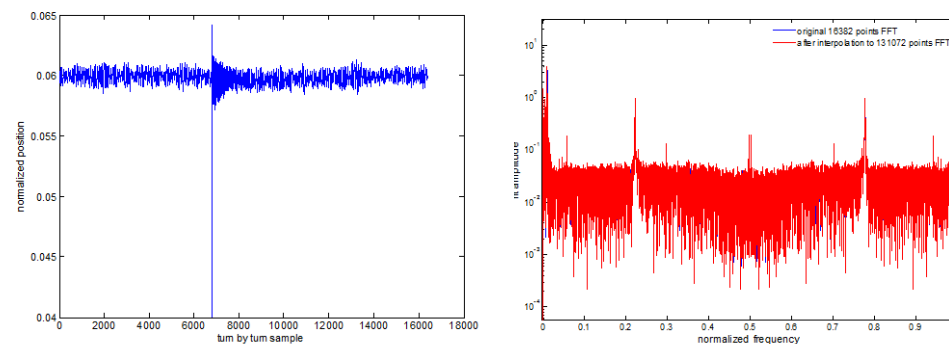
频谱放大

# SSRF DBPM样机--束流异常检测

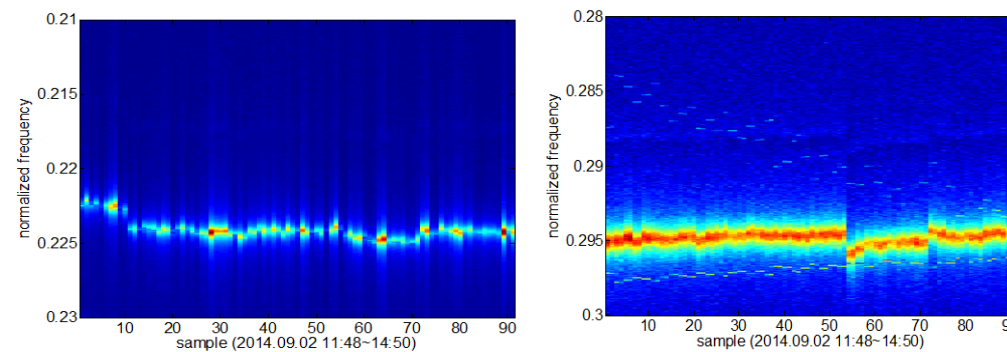


**应用:** 束流运行异常、工作点长期在线监测、不明原因丢束。

**原理:** 检测时域和频域信号，异常发生时锁存数据。数据可用于故障分析，提高光源性能，和工作点在线监测。

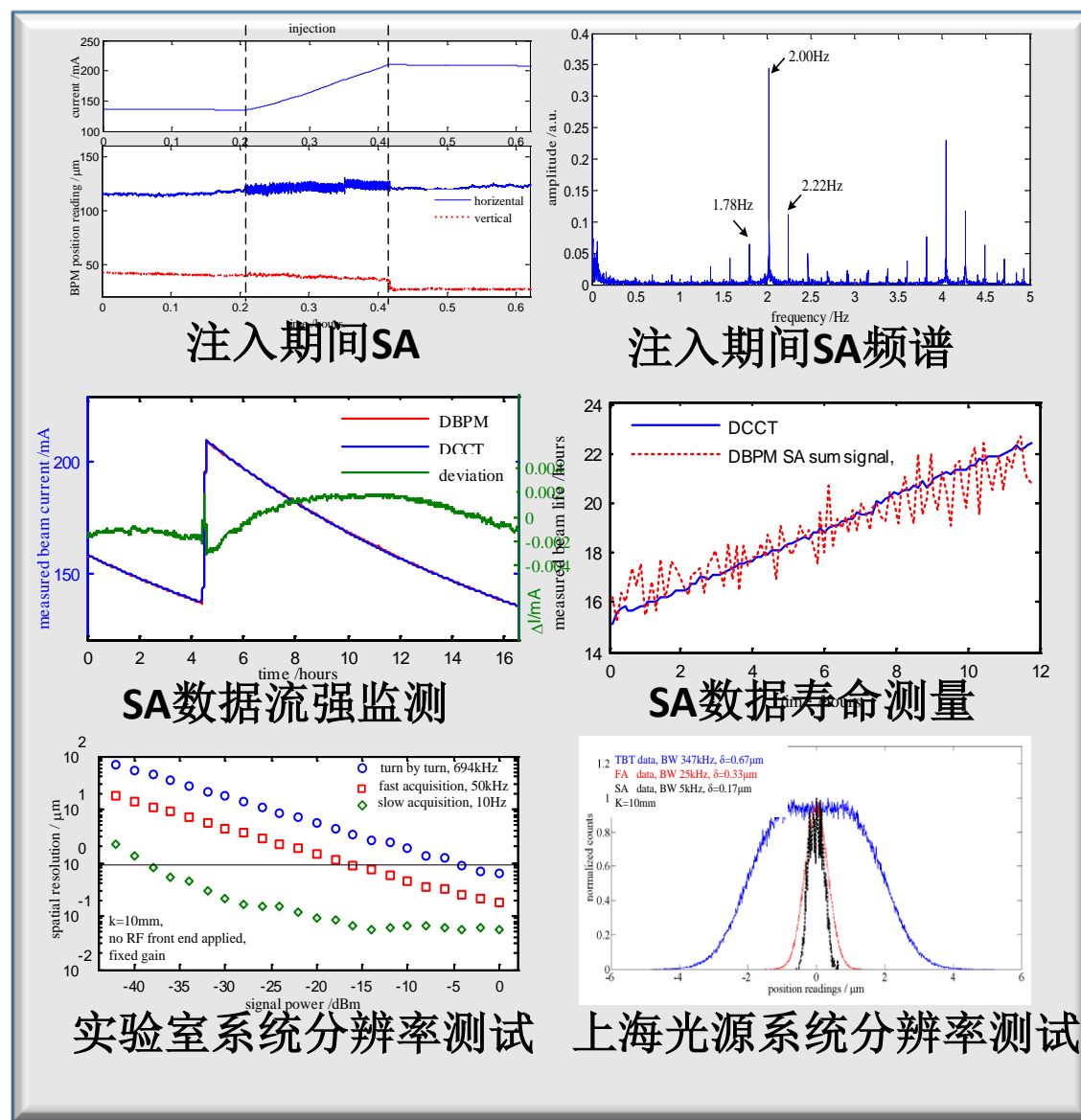
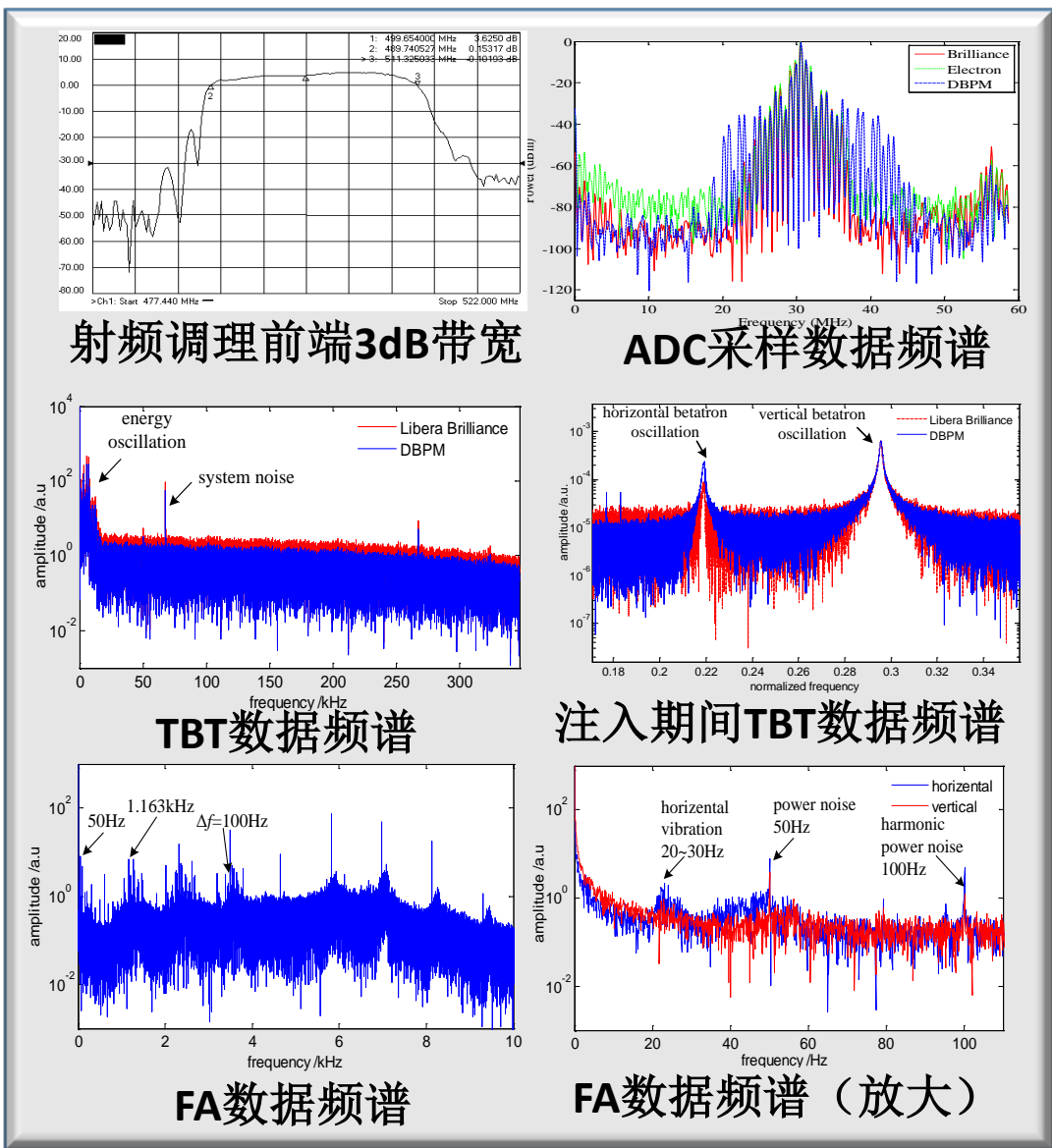


注入时采集水平方向的时域和频域数据



工作点在线监测 (2014.9.2 11:48~14:50)

# SSRF DBPM样机—亚微米分辨率@逐圈





# FEL BPM处理器需求分析

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| 条带BPM系统指标 | 位置分辨率 $10 \mu\text{m} @ 0.5\text{nC}$ |
| 腔式BPM系统指标 | 位置分辨率 $1 \mu\text{m} @ 0.5\text{nC}$  |

# FEL DBPM功能需求（条带BPM & 腔式BPM）



- 同一硬件设计，同时满足两种探头信号处理
- 射频信号处理成中心频率500MHz，带宽20MHz左右，衰减可调
- ADC采样率100MHz以上，有效位10位以上，带宽大于520MHz
- 高性能FPGA满足复杂数字信号处理需求
- 四通道，外/自触发，外/内时钟
- Linux+EPICS IOC





# 设备开发



## 嵌入式Standalone结构

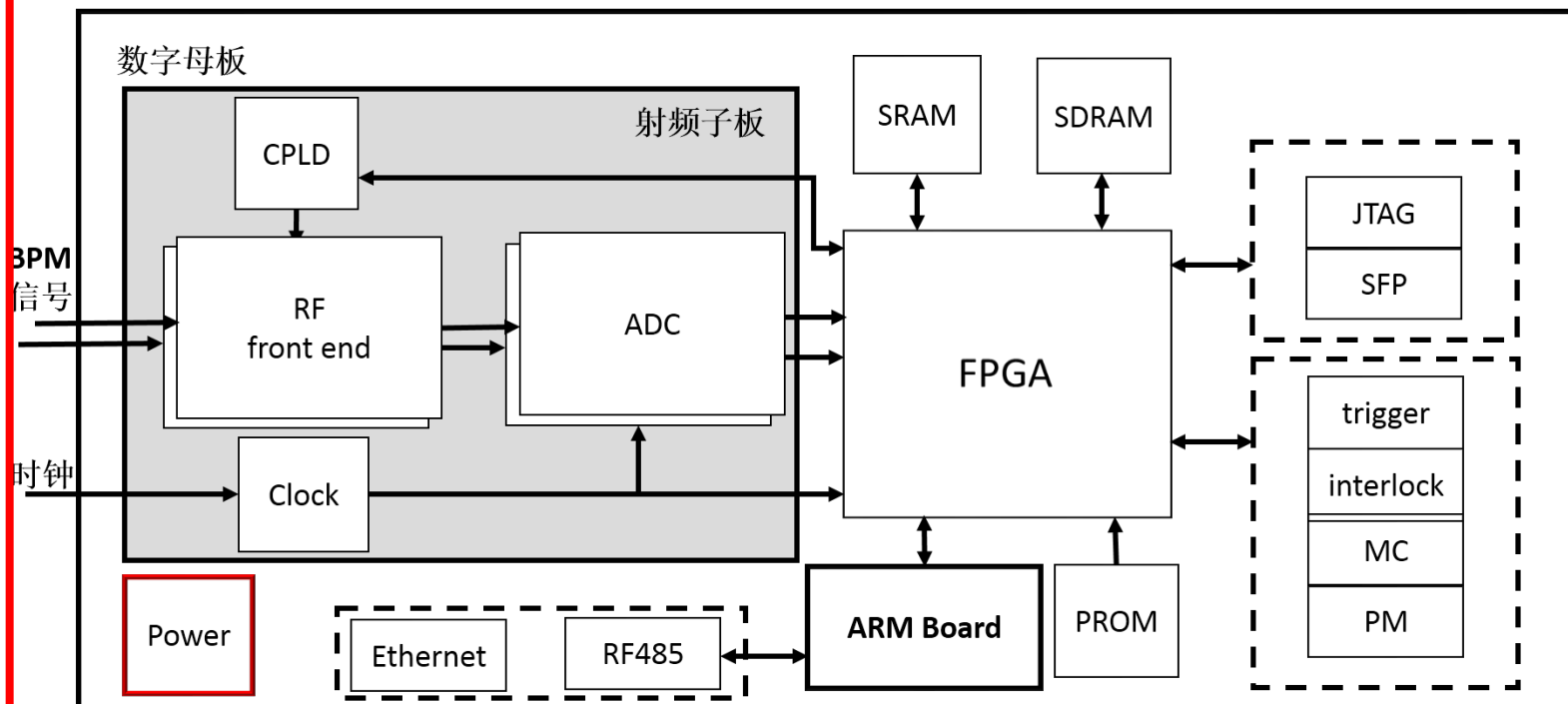
硬件结构分成两部分：

- 射频载板

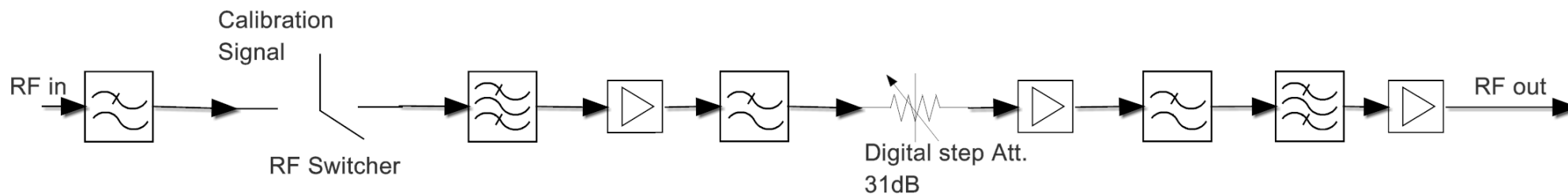
- 射频信号调理
- ADC
- CPLD
- 时钟（内/外）

- 数字母板

- FPGA
- RAM（存储数据）
- 外围接口
- ARM板
- 电源



# DBPM硬件—射频载板



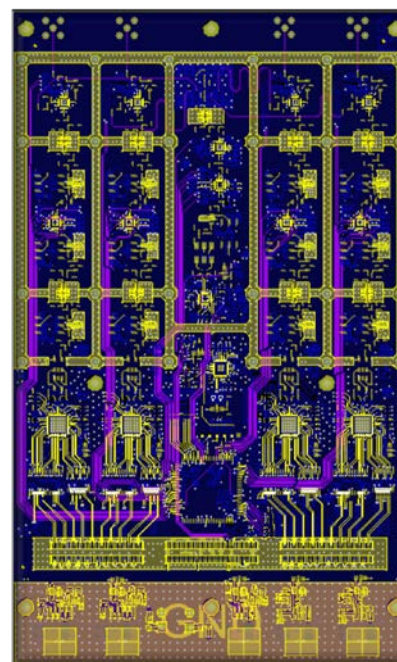
射频信号处理链

## 射频前端:

- 窄带声表滤波器 (SAW), 中心频率 500MHz, 3dB带宽12MHz
- 多级放大滤波
- 31dB可调衰减

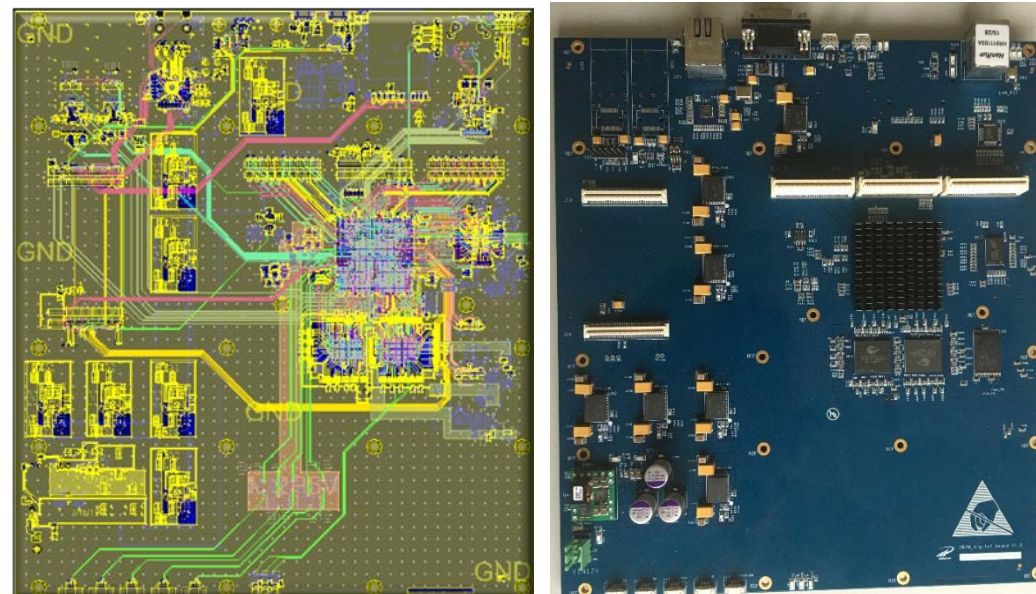
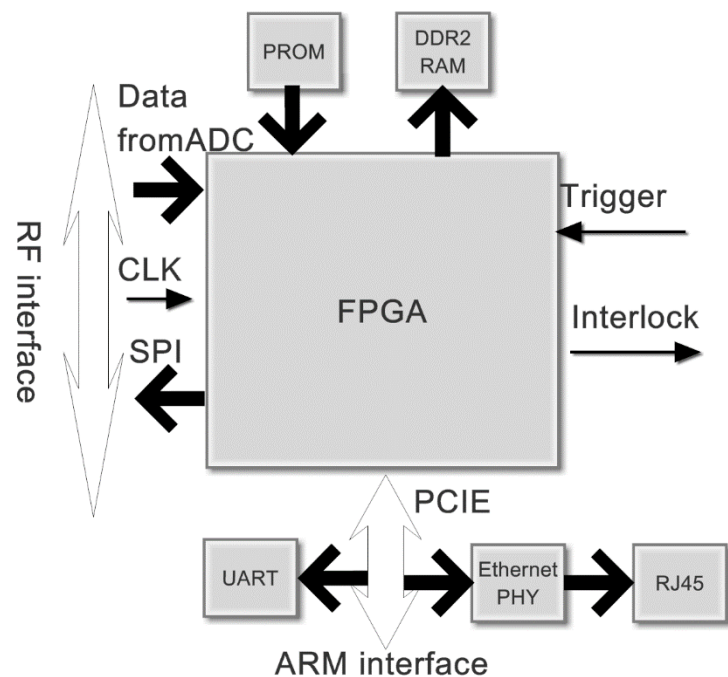
## ADC

- 16bit, 125MSPS, 带宽650MHz



射频载板

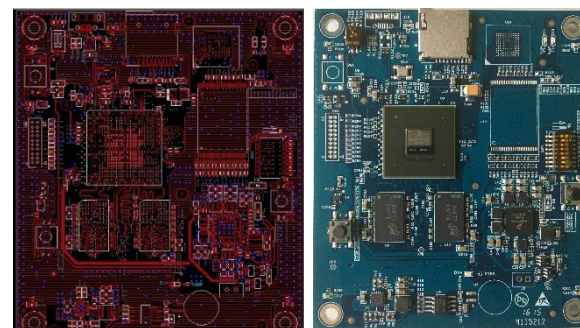
# DBPM硬件—数字母板



数字母板

## 数字母板:

- **FPGA XC5VSX50T**
- **ARM Freescale iMX6**
- **FPGA与ARM之间PCIE接口通信**
- **FPGA与射频板CPLD之间SPI接口通信**



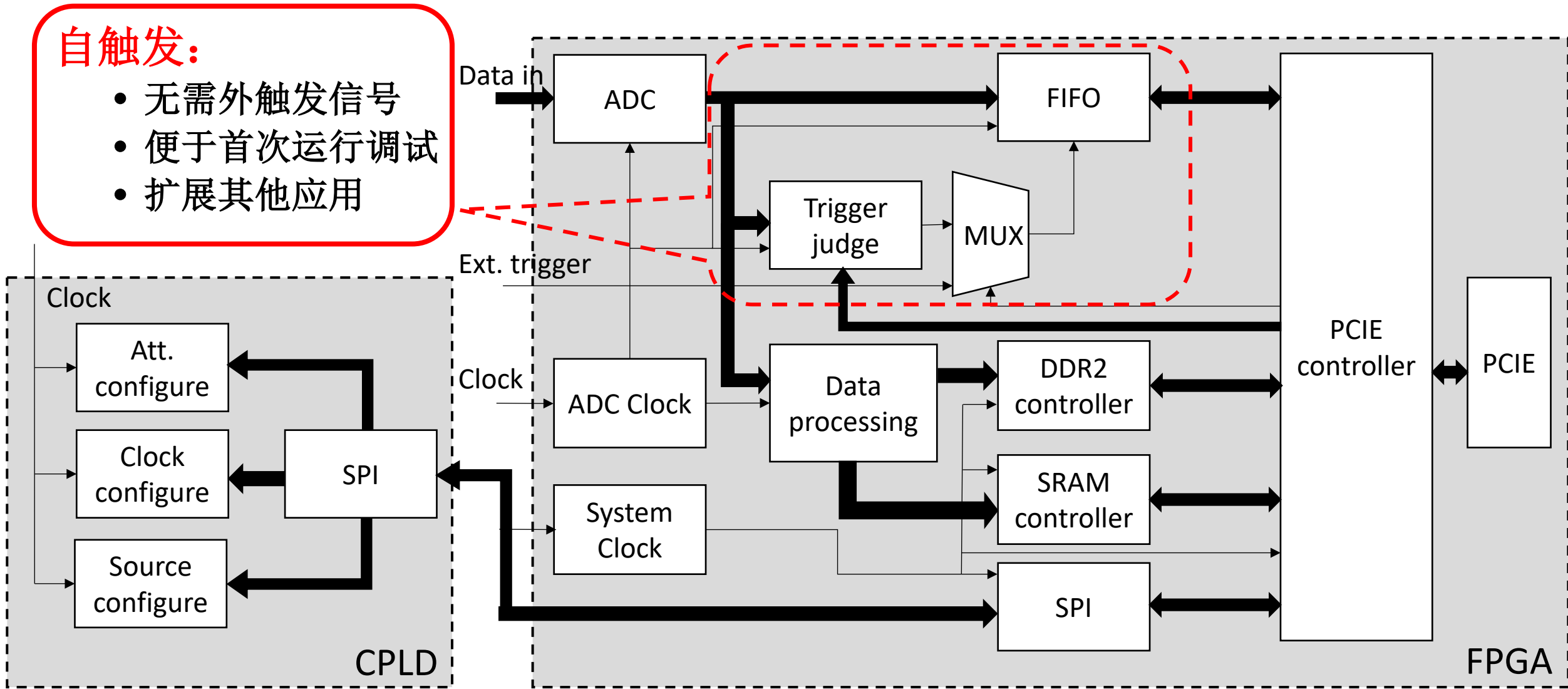
ARM板

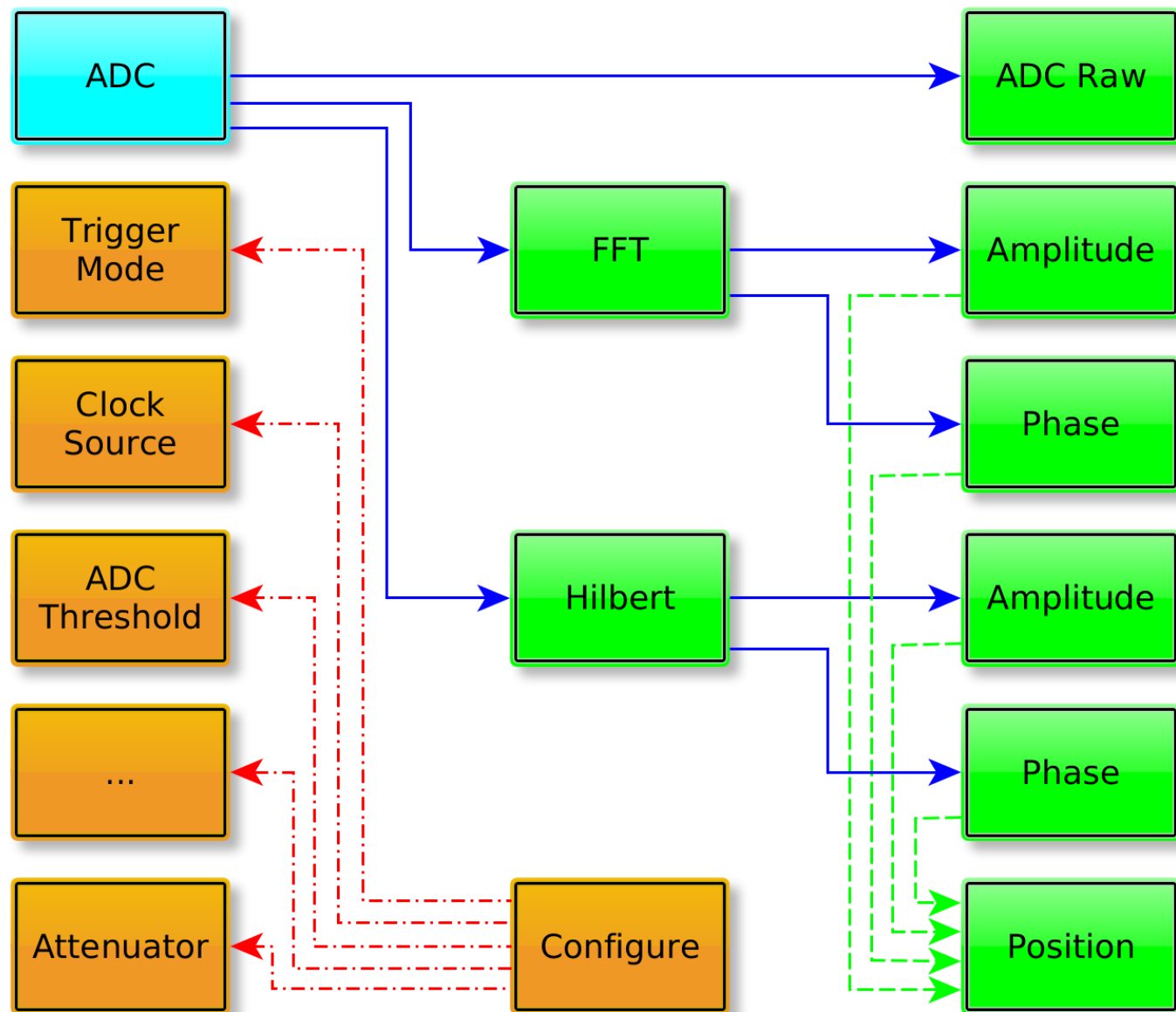


# DBPM firmware(FPGA+CPLD)开发

## 自触发:

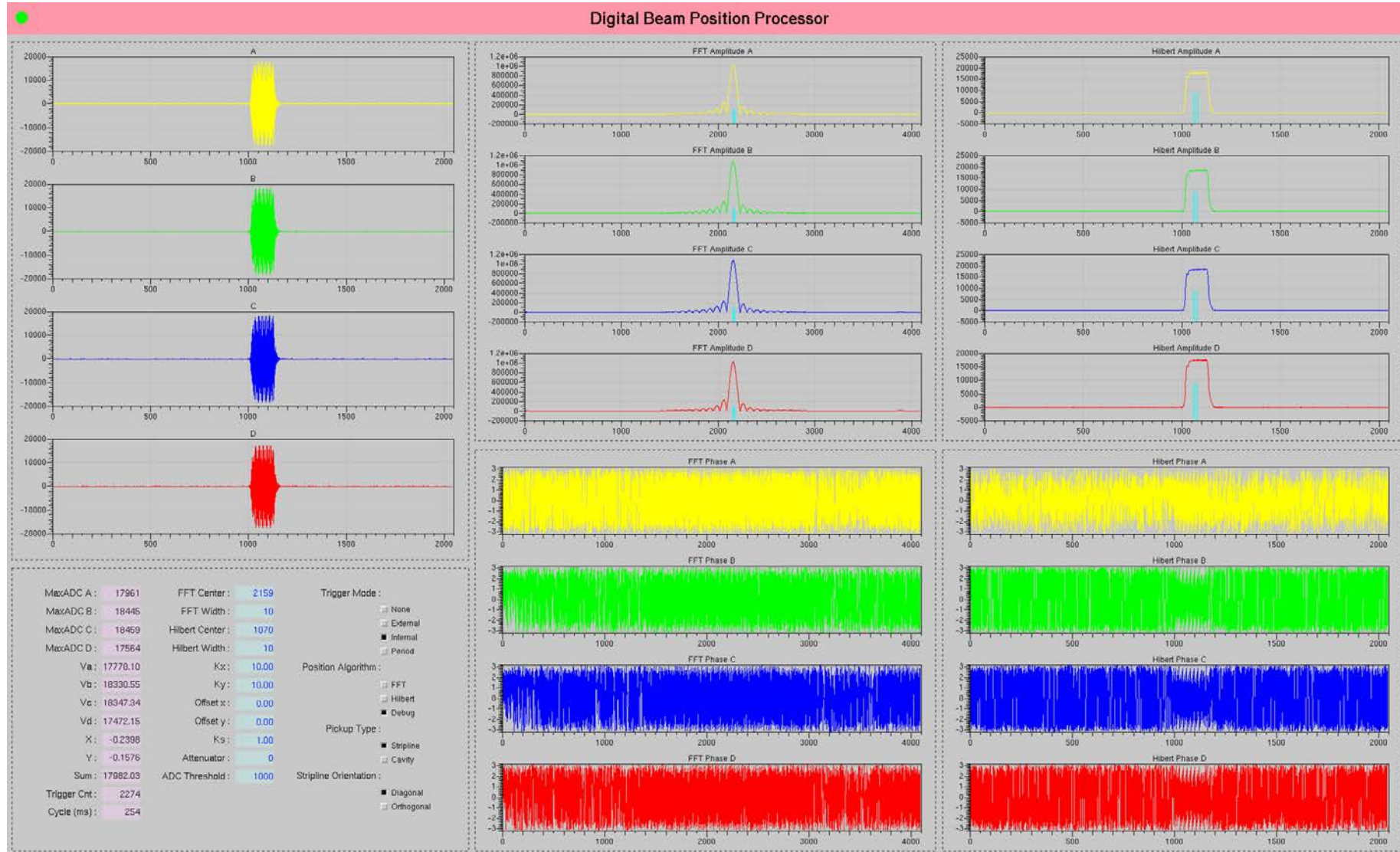
- 无需外触发信号
- 便于首次运行调试
- 扩展其他应用





- 多种运行模式
- 实现FFT, Hilbert
- 多种参数设置

# EDM控制面板

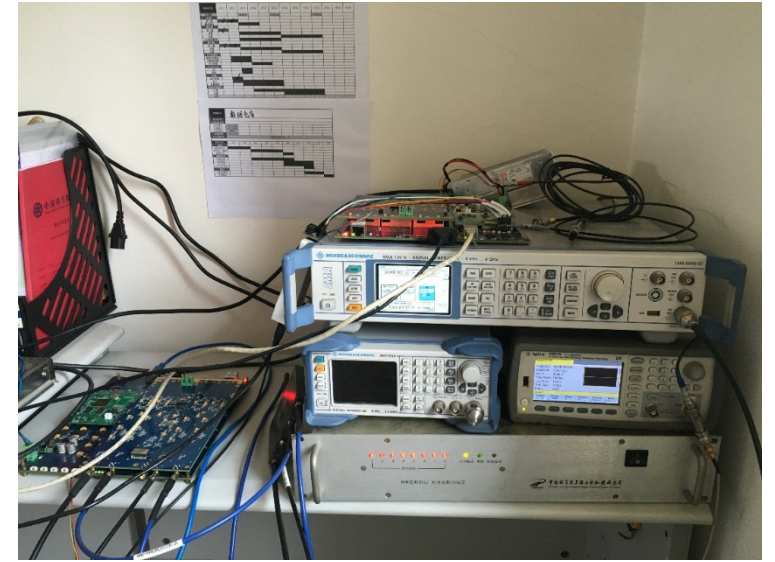
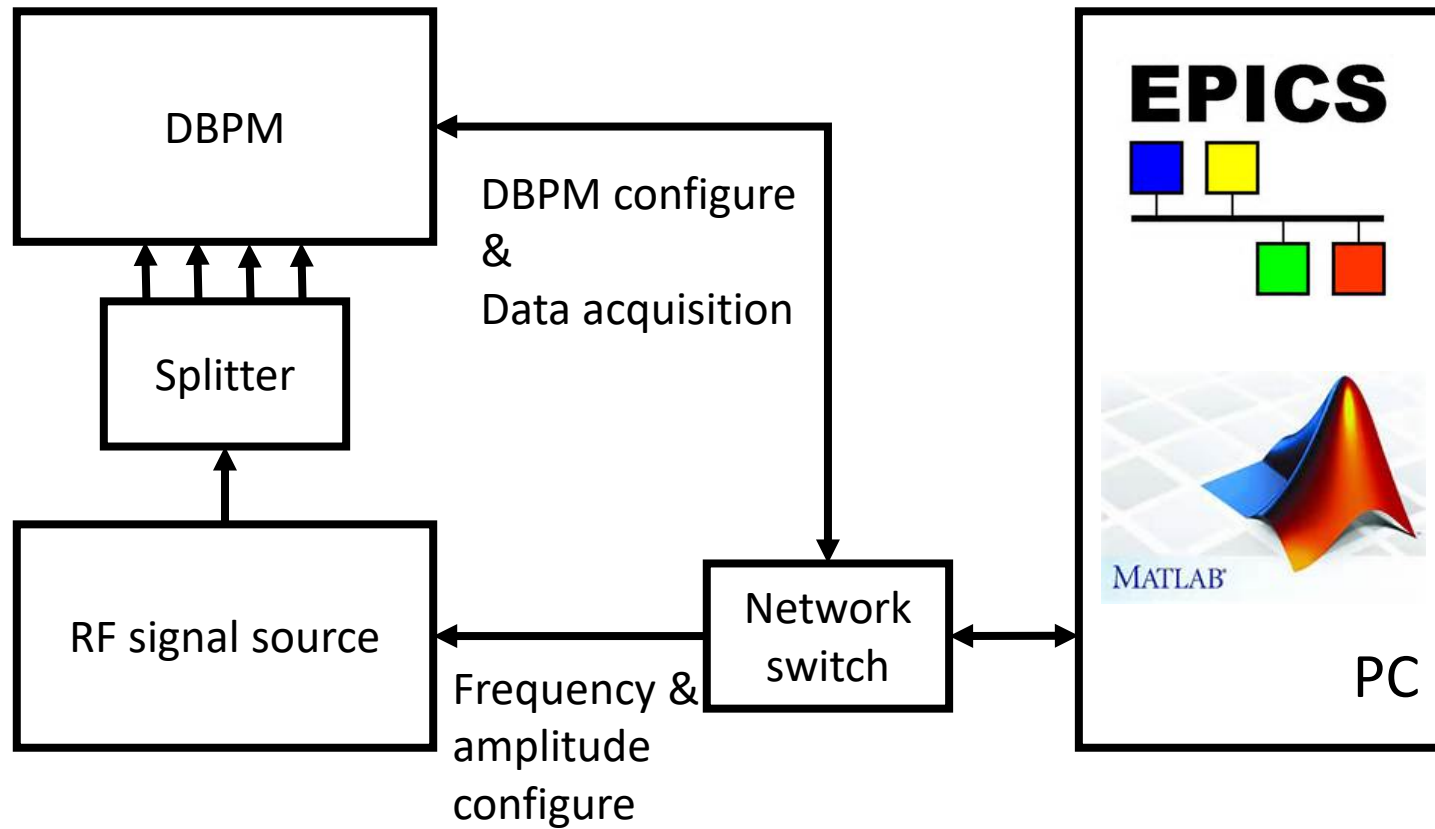




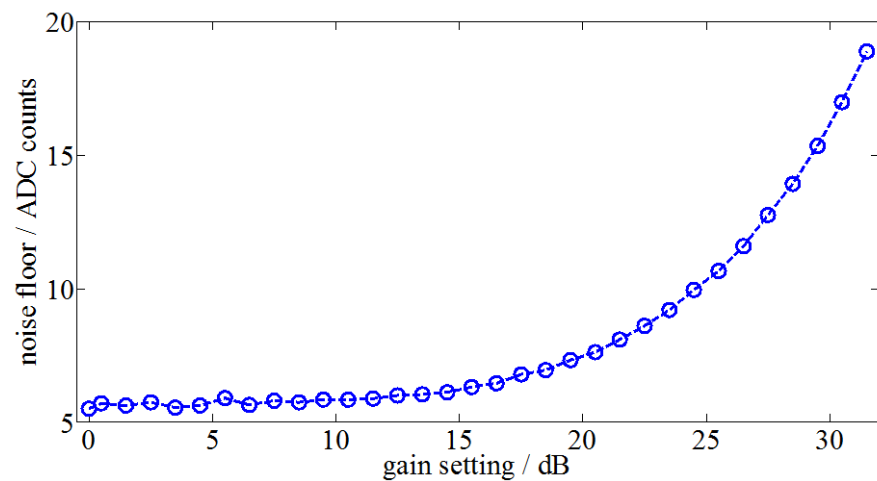
# 设备测试



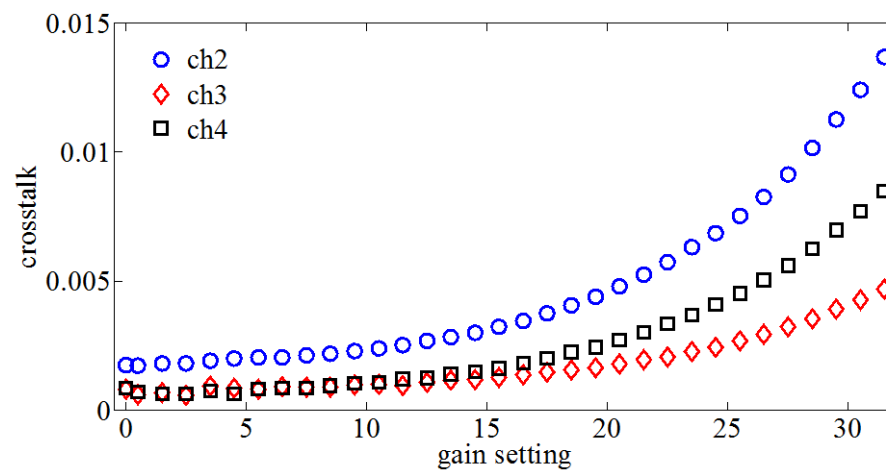
为满足批量测试需求，开发了基于EPICS-MATLAB自动测试平台，提高测试效率



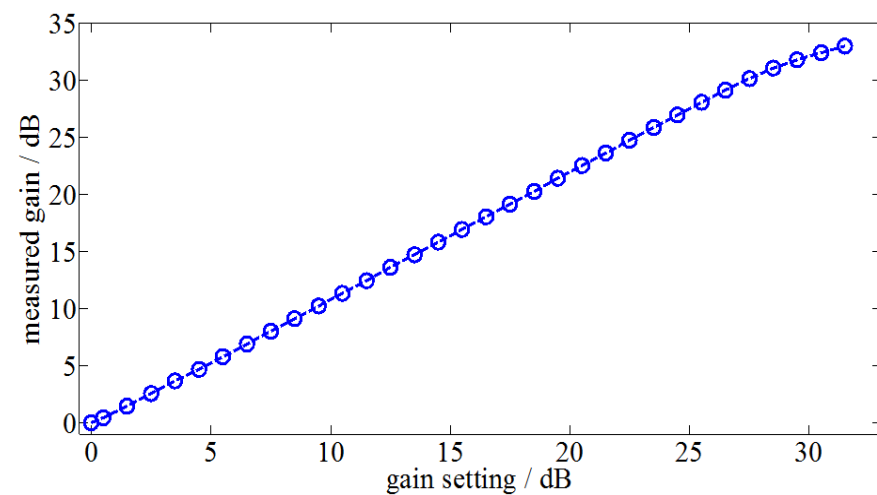
# 测试结果



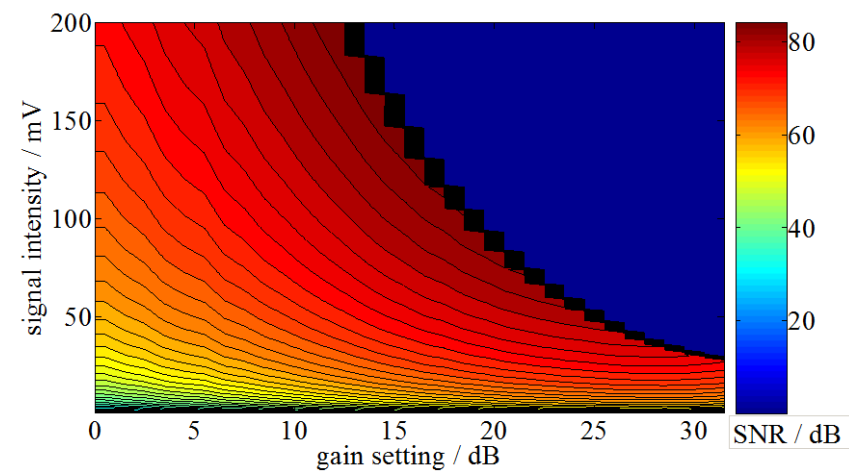
(a) ADC噪声



(b) 通道串扰

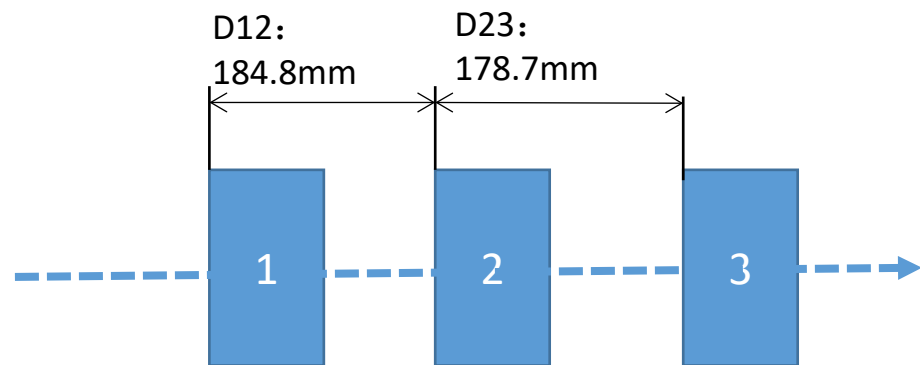
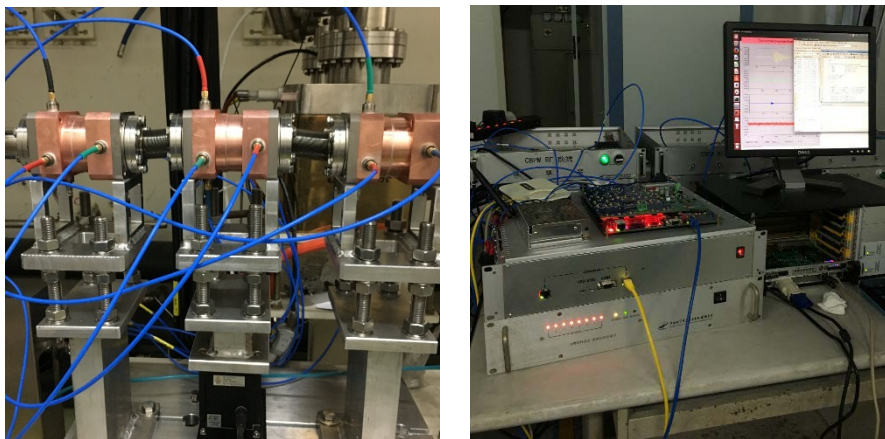


(c) 增益线性度



(d) 信噪比SNR

# SDUV评估测试

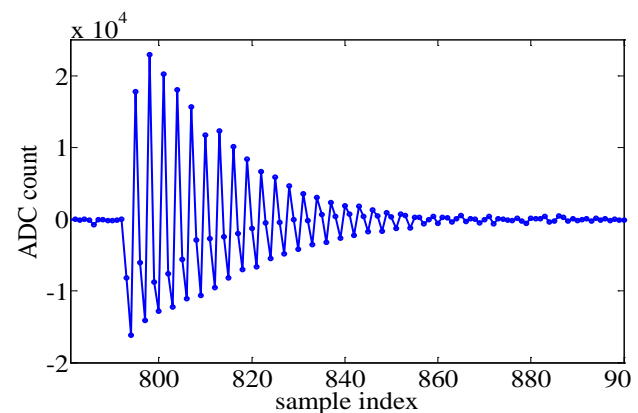


BPM2期望值:  $UX2\_exp = (D12 * UX3 + D23 * UX1) / D13$ ;

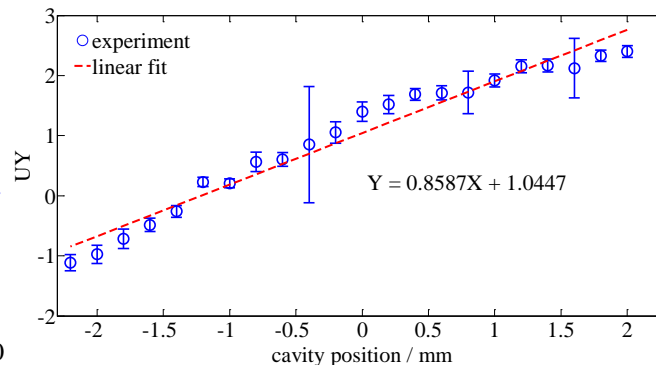
留数:  $ResdX = UX2 - UX2\_exp$ ;  $ResdY = UY2 - UY2\_exp$ ;

几何因子:  $GeoFactor = 1 / \sqrt{((D23/D13)^2 + (D12/D13)^2 + 1)}$ ;

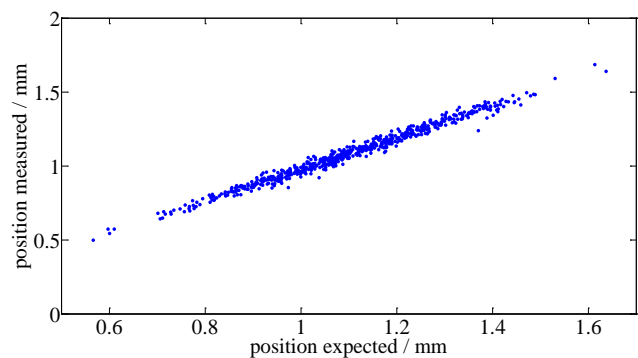
分辨率 =  $G\_factor * Residual\_RMS / k$



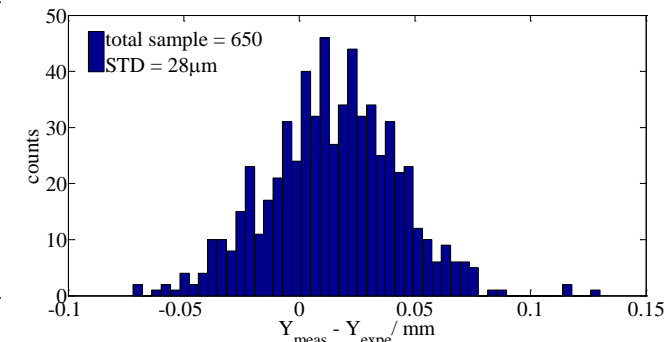
(a) IF raw data from a reference cavity



(d)  $k$  value calibration



(c) Position expected VS measured

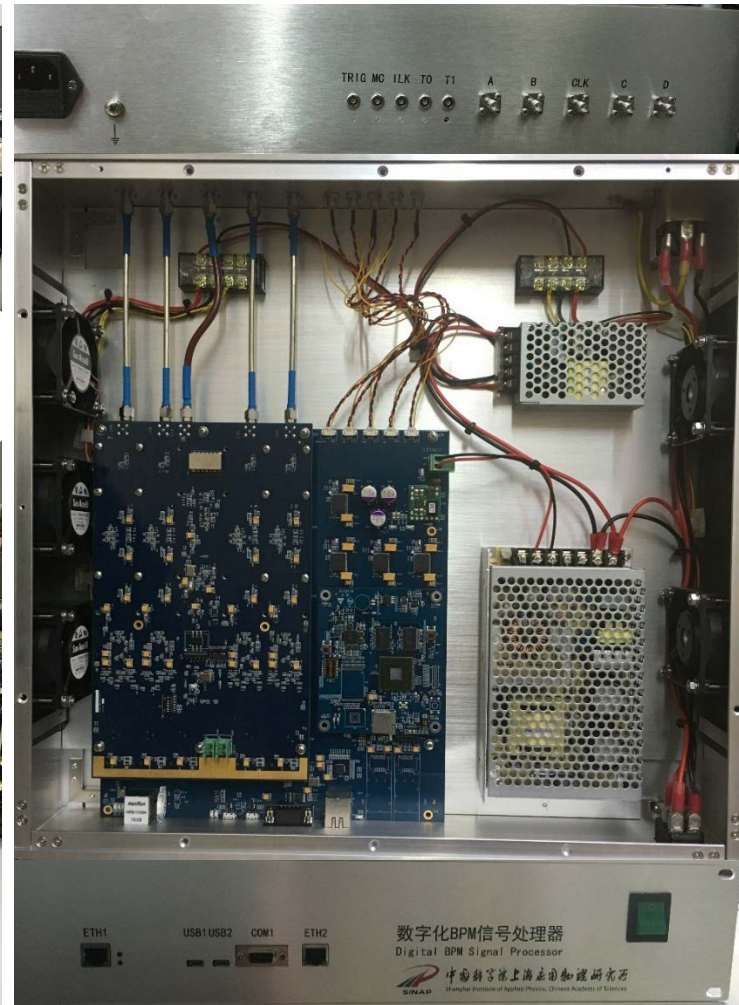
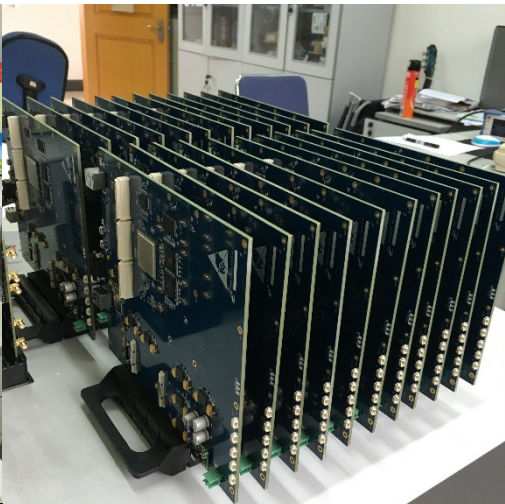


(d) resolution evaluation



# 在FEL装置上的应用

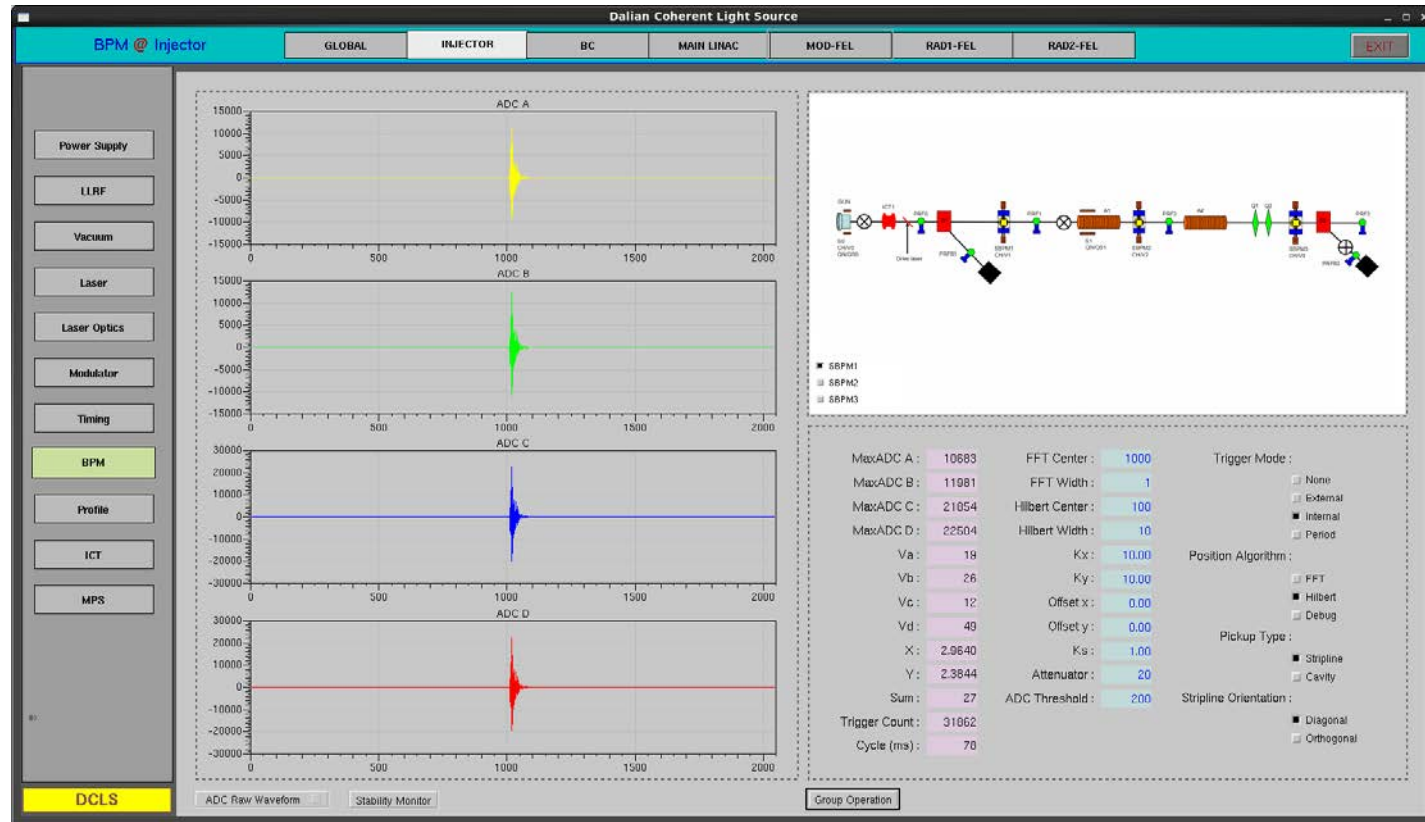
# 批量生产



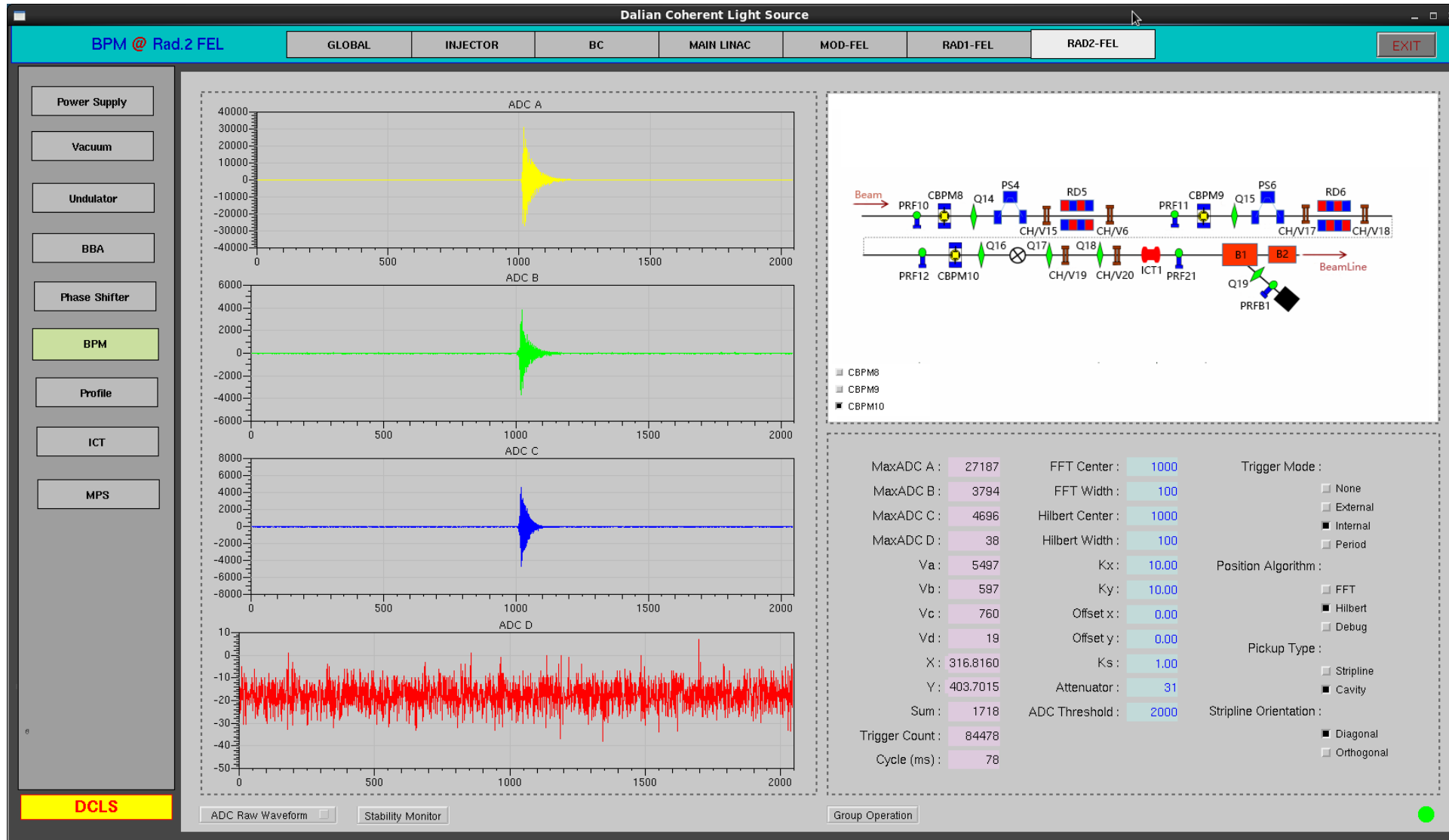
# 在FEL上的应用



已成功在大连极紫外相干光源DCLS和上海软x射线自由电子激光SXFEL批量使用，共计80台。



# DCLS应用数据



波荡器第一个  
CBPM位置，  
前端已有  
Profile靶挡住  
束流，处理器  
仍有很强的信号，  
非常灵敏。



- 完成国内首套数字化束流信号处理器的原理样机、工艺样机开发；实现批量化生产及应用
- 实验室测试信噪比达到80dB
- 束流单次通过测试相对位置分辨率好于千分之一
- 上海光源储存环中，逐圈位置分辨率达到亚微米，
- DCLS和SXFEL装置中，在500pC流强下使用该处理器的条带BPM系统和腔式BPM系统分辨率分别达到4 $\mu$ m和0.4 $\mu$ m
- 软、硬件能够长期稳定运行，整体处理器性能达到国际同类设备先进水平。





谢谢关注！