



第21届全国核电子学与核探测技术学术年会（湖北·恩施）

SHINE加速器测控系统与电子学开发

阎映炳

中国科学院上海高等研究院

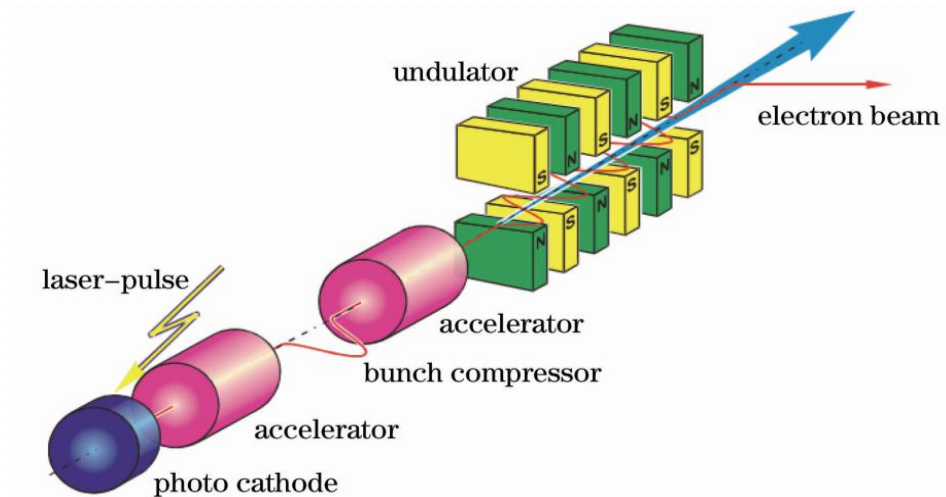
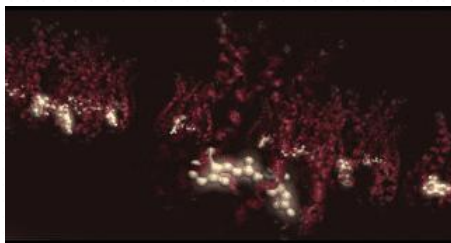
SHINE

目录



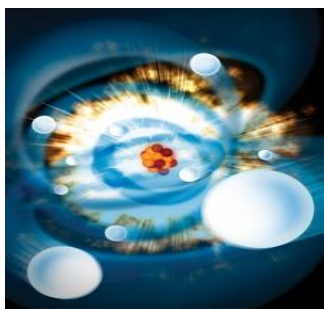
- SHINE 项目简介
- 加速器测控系统
- 束流信号处理器
- White Rabbit 定时节点
- 后续开发计划

X射线自由电子激光装置



- 超快时间分辨: fs
- 超高空间分辨: Å
- 超强峰值亮度: 10^{33}

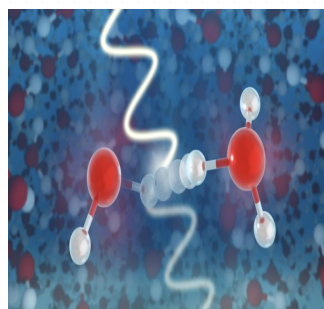
**X射线自由电子激光的出现
促进了多个学科前沿的发展**



Nature 2010

原子分子

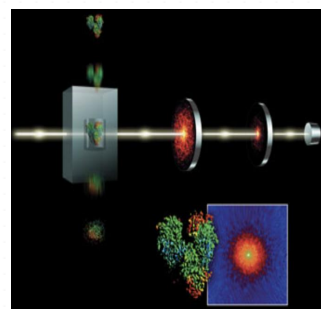
XFEL第一个实验



Science 2020

超快化学

水分子自由基的形成



Science 2018

结构生物学

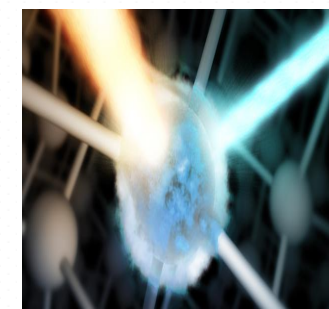
细菌光敏蛋白的变化



Nature 2017

材料科学

冲击波导致晶格错位



Science 2020

非线性光学

X射线受激拉曼

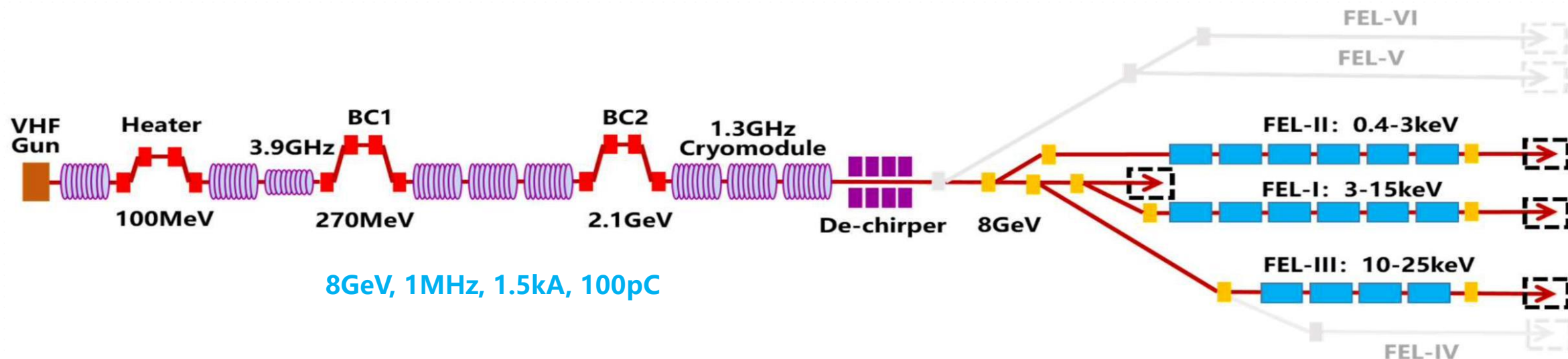
X射线自由电子激光装置



装置名称	国家	波长 (nm)	投资经费	运行年度
FLASH	德国	3.00	1.02亿欧元	2007
LCLS	美国	0.15	3.79亿美元	2009
SACLA	日本	0.06	3.50亿美元	2011
FERMI	意大利	4.00	0.95亿美元	2012
PAL-XFEL	韩国	0.10	4.00亿美元	2016
European XFEL	德国	0.05	12.2亿欧元	2017
SwissFEL	瑞士	0.10	2.75亿瑞郎	2019
LCLS-II	美国	0.25	9.00亿美元	2023

- **发达国家积极部署**，国际上已经有7台X射线自由电子激光建成，并投入运行
- **我国政府高度重视**，先后部署了多台短波长自由电子激光大科学装置的建设

硬X射线自由电子激光装置



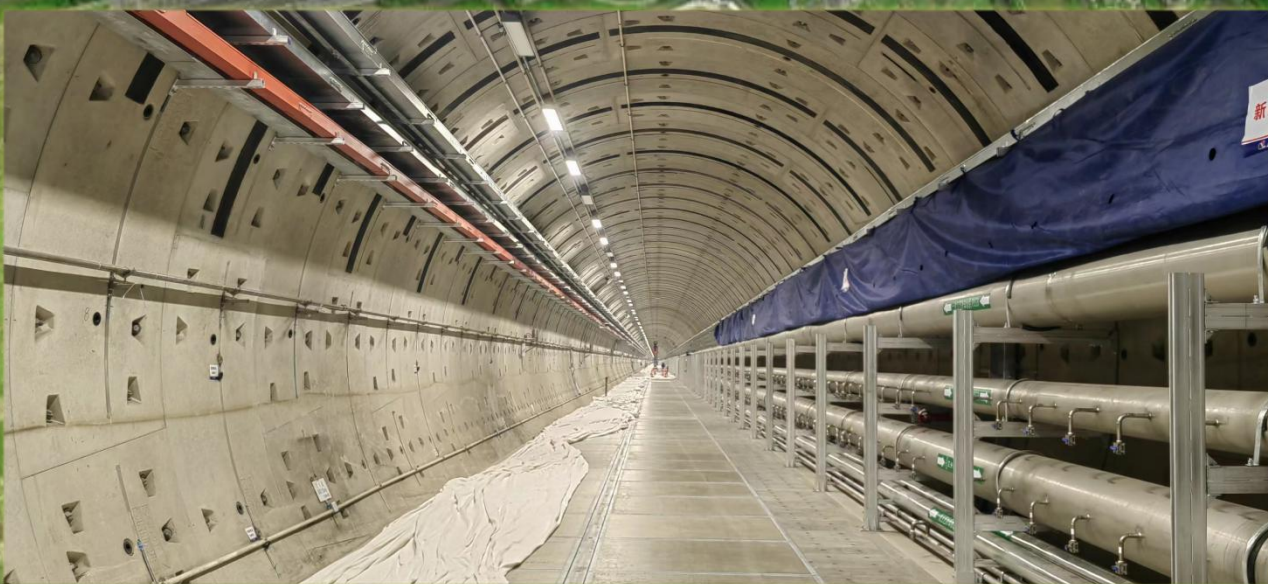
Shanghai High repetition rate XFEL and Extreme Light Facility, SHINE

十三五规划中首个启动的国家重大科技基础设施建设项目
张江综合性国家科学中心重大科技基础设施群的重要组成部分

装置建成之后，将成为世界上最高效和最先进的自由电子激光用户装置之一

为物理、化学、生命科学、材料科学、能源科学等多学科提供高分辨成像、超快过程探索、先进结构解析等尖端研究手段
形成独具特色、多学科交叉的先进科学研究平台，打造具有全球影响力的光子科学中心，推动我国光子科学实现由跟随到引领的飞跃

SHINE

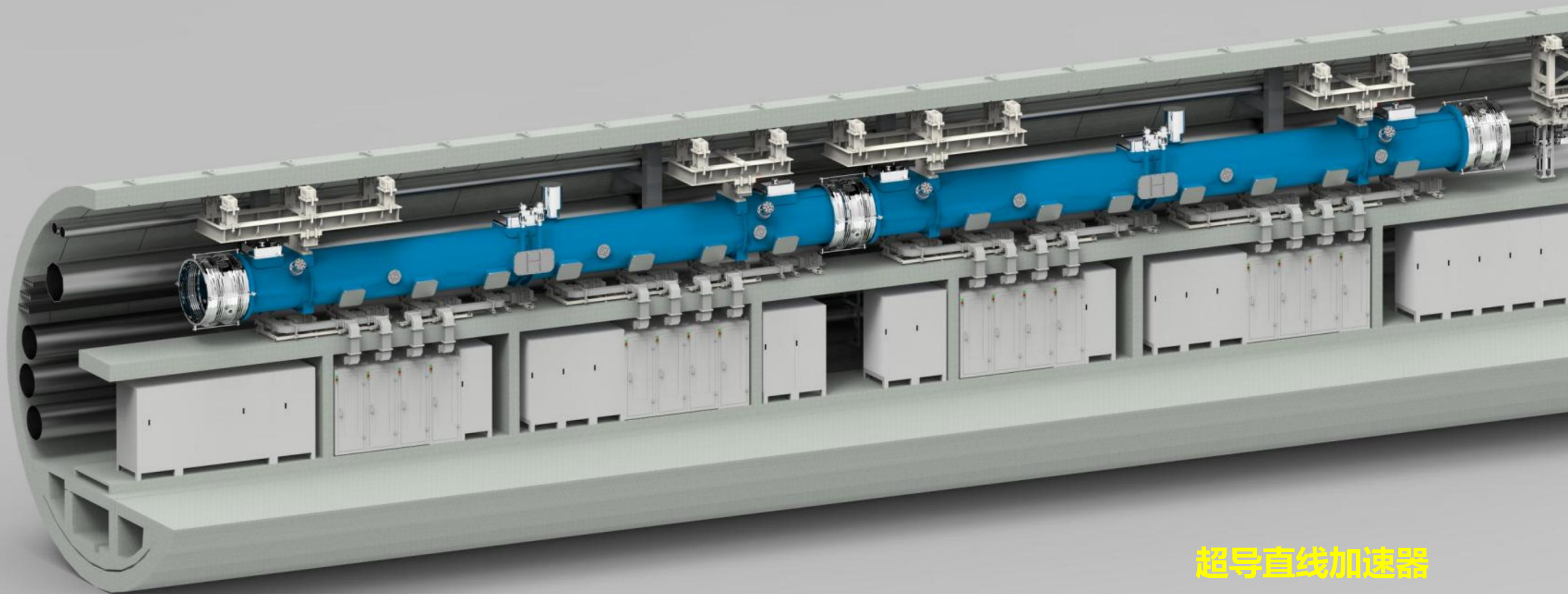


SSRF

SXFEL

SHINE

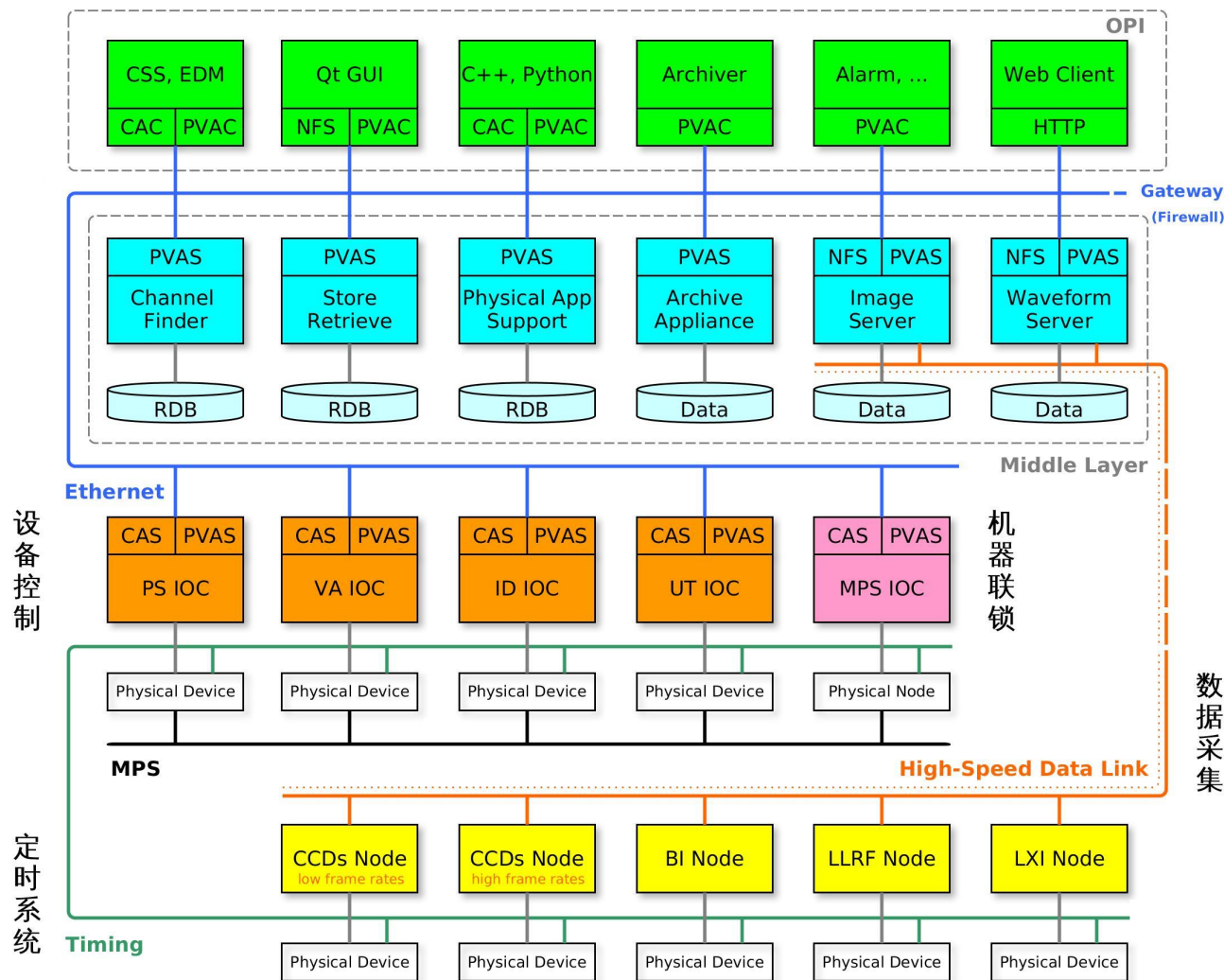
硬X射线自由电子激光装置



超导直线加速器

加速器测控系统

- ❑ 设备控制
- ❑ 数据采集
- ❑ 联锁保护
- ❑ 定时系统
- ❑ 控制网络
- ❑ 运行环境
- ❑ 数据存储
- ❑ 用户界面
- ❑ 上层软件
- ❑ 中央控制室



加速器控制系统:

1. 实施对注入器、超导加速器、束流分配、波荡器系统中各类设备的全面控制
2. 提供硬X射线自由电子激光装置调试和运行的平台
3. 满足加速器物理学家、工程技术人员对设备监控、数据获取与分析等方面的需求

EPICS

SHINE

加速器测控系统

全开源大型分布式控制系统，国产Linux OS，原版+改版+自研EPICS软件包，V7+V3混合运行



一体化机柜



网络核心交换机



文件服务器



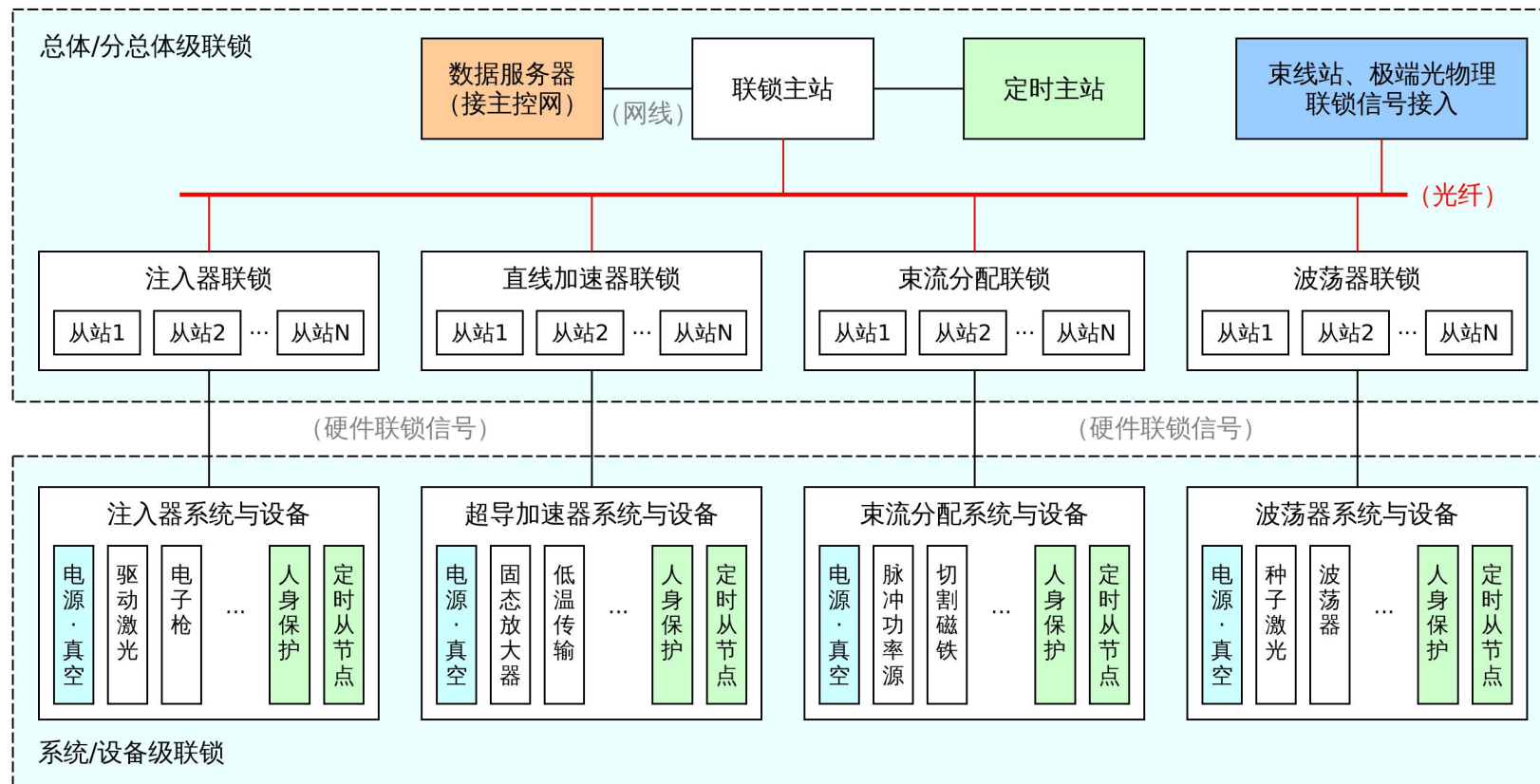
设备控制器



联锁保护站点

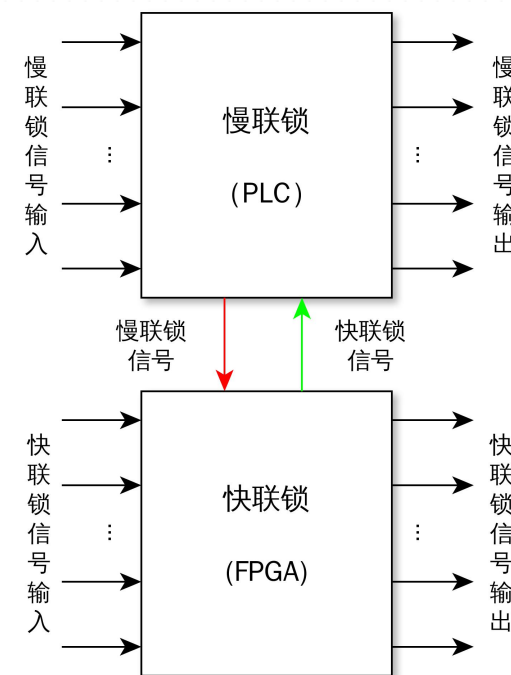
加速器联锁系统

❑ 快联锁 + 慢联锁；主站 + 从站，分层设计



全硬件联锁逻辑、全电气隔离接口、失效安全性原则、采用成熟的硬件

- ❖ 快联锁关键信号响应时间：
站内 $\leq 10\mu s$ ，站间 $\leq 100\mu s$
- ❖ 慢联锁关键信号响应时间：
站内 $\leq 20ms$ ，站间 $\leq 100ms$



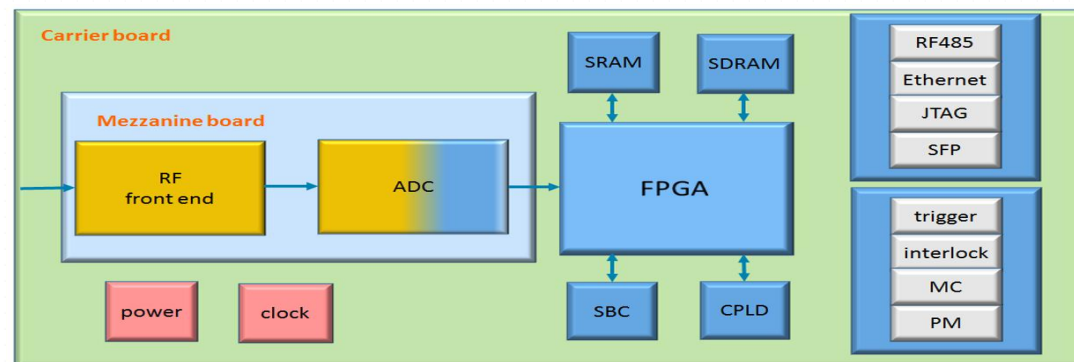
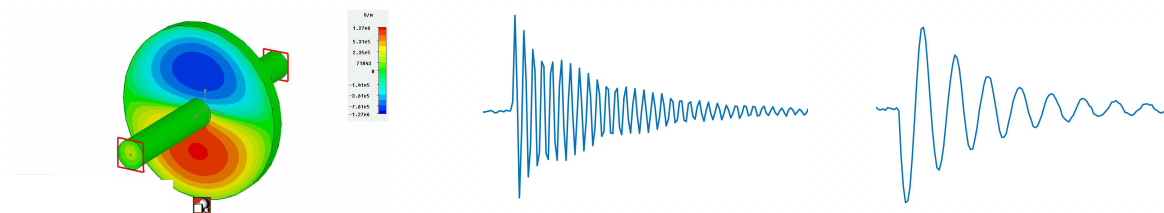
束流信号处理器

□ 第一代束流信号处理器平台

- 同步辐射光源处理器（条带BPM，纽扣BPM，...）
- 自由电子激光处理器（条带BPM，腔式BPM，腔式BAM，...）

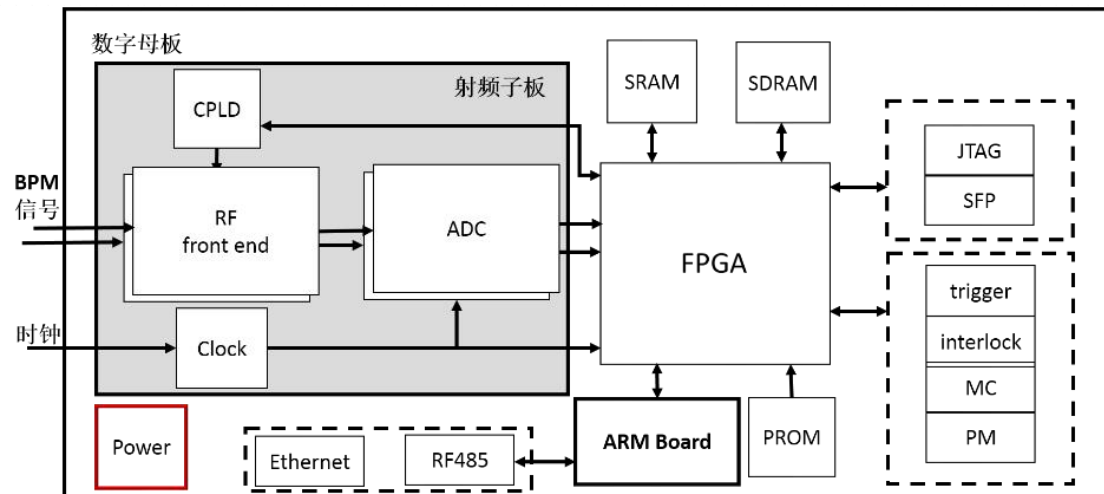
□ 第二代束流信号处理器平台

- 同步辐射光源处理器（百MSa/s）
- 自由电子激光处理器（ ~ 1 GSa/s）
- 射频直采处理器（ ~ 3 GSa/s）



束流信号处理器

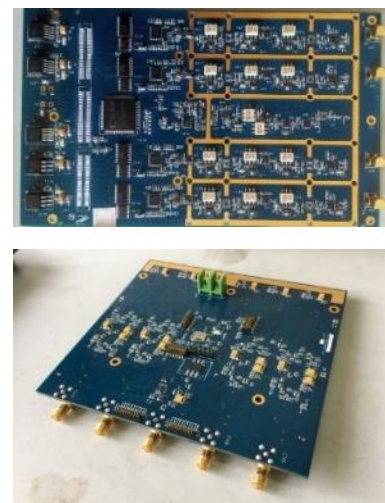
- ❑ 第一代束流信号处理器平台
- ❑ 基于FPGA+ARM的嵌入式子母板结构
- ❑ 搭载不同前端ADC子板匹配不同应用
- ❑ FPGA信号处理，多种运行模式
- ❑ 集成EPICS分布式控制系统



Parameters	Value
Channels	4
Central Frequency	500MHz & wideband
Bandwidth	~20MHz & wideband
Dynamic range	31dB & NA
ADC bits	16
ADC Bandwidth	650MHz
Max ADC Rate	125MSPS
FPGA	Xilinx xc5vsx50t
Clock	Ext./Int.



FPGA数字母板



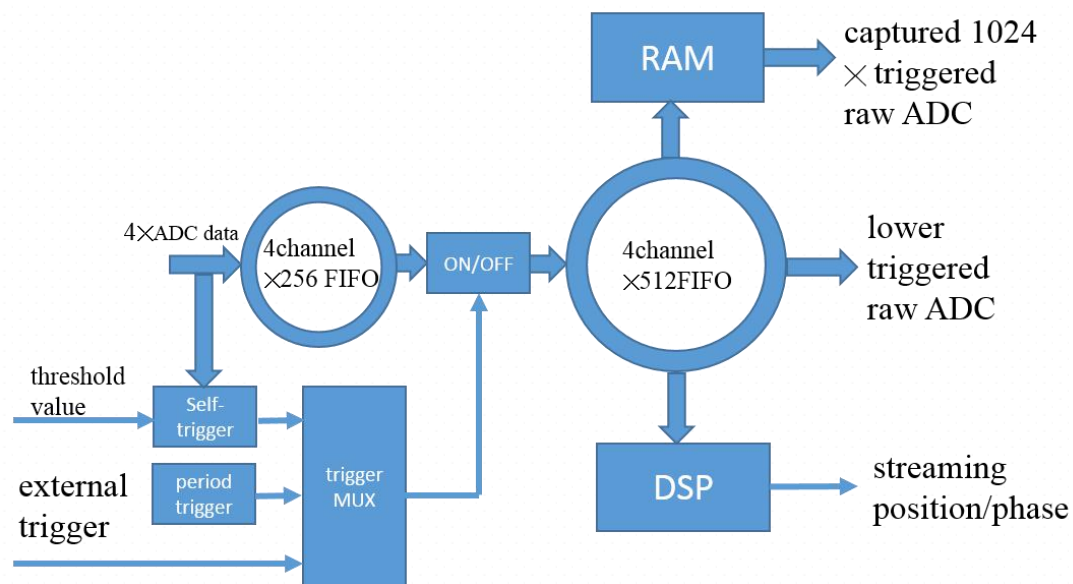
窄 & 宽带模拟子板



批量应用 (SXFEL & DCLS ~ 180)

束流信号处理器

- ❑ 提供Capture模式的多次触发ADC数据
- ❑ 提供Streaming模式的ADC、位置、相位数据
- ❑ 实现相位旋转和方向判断，束流到达时间测量



FPGA逻辑结构

❑ 2020年8月软X射线自由电子激光实验装置项目通过国家工艺验收

三、通过自主研制和国内外合作，掌握了自由电子激光装置和射频超导加速单元设计、加工集成、安装和调试等关键核心技术，研发了一系列国际一流水平的关键设备。特别是：

1、国际首创 EEHG-HGHG 混合级联型 FEL 的先进运行模式；发展了基于偏转腔的 FEL 脉冲在线诊断方法，首次实现了纵向时间反馈技术；同时发展了激光加热和 X 波段谐波校正的束流纵向相空间操控技术，基于辐射光准直的 FEL 调试方法，高亮度电子束电荷量、轨道、能量和束长等高精度反馈控制技术。

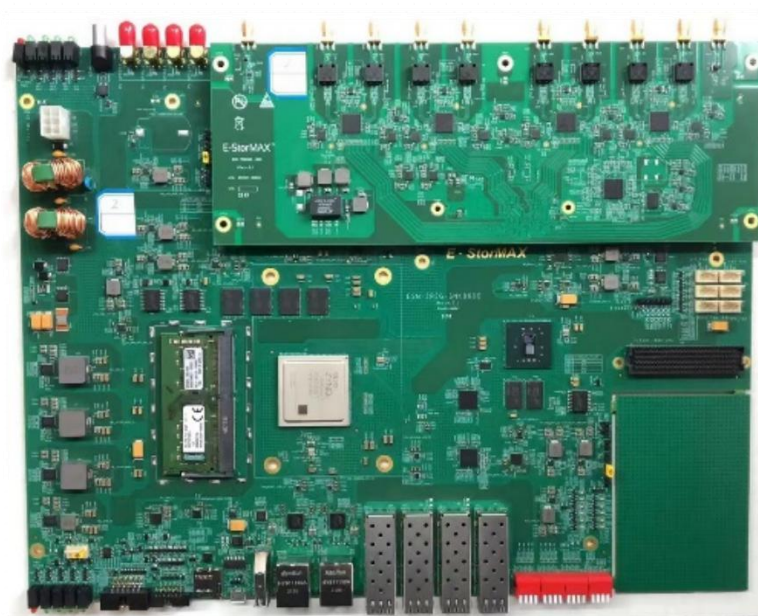
2、国内首次研制了高梯度 C 波段加速单元，平均运行梯度目前居国际同类装置最好水平；光阴极微波电子枪的亮度和基于条带电极的高分辨束流位置测量器均达到国际先进水平；首次成功研制了小间隙短周期高精度长波荡器、铝拉伸小孔径真空室、腔式束流位置探测器系统和基于脉冲光纤激光的飞秒同步系统。

束流信号处理器

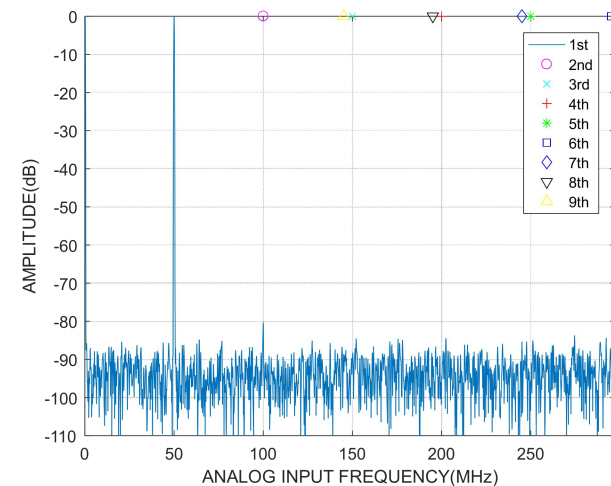
- ❑ 第二代束流信号处理器平台
- ❑ 基于片上系统FPGA研制新一代数字信号处理平台
- ❑ 沿用子母板独立架构，增加White Rabbit定时子板接口
- ❑ 增加导频信号输出进行慢漂补偿，进一步提高了系统性能



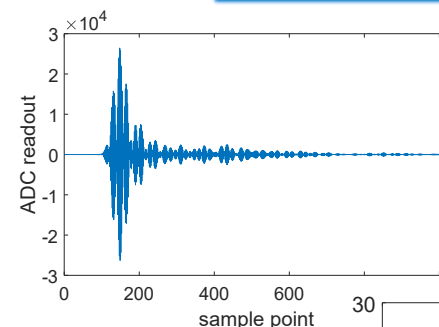
SHINE 通用束流信号处理器



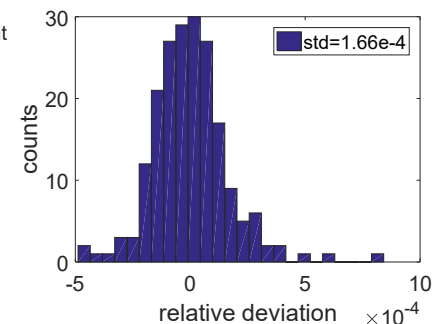
1GSa/s采样率, 14bits, 2GHz带宽



四通道有效位: 10.85

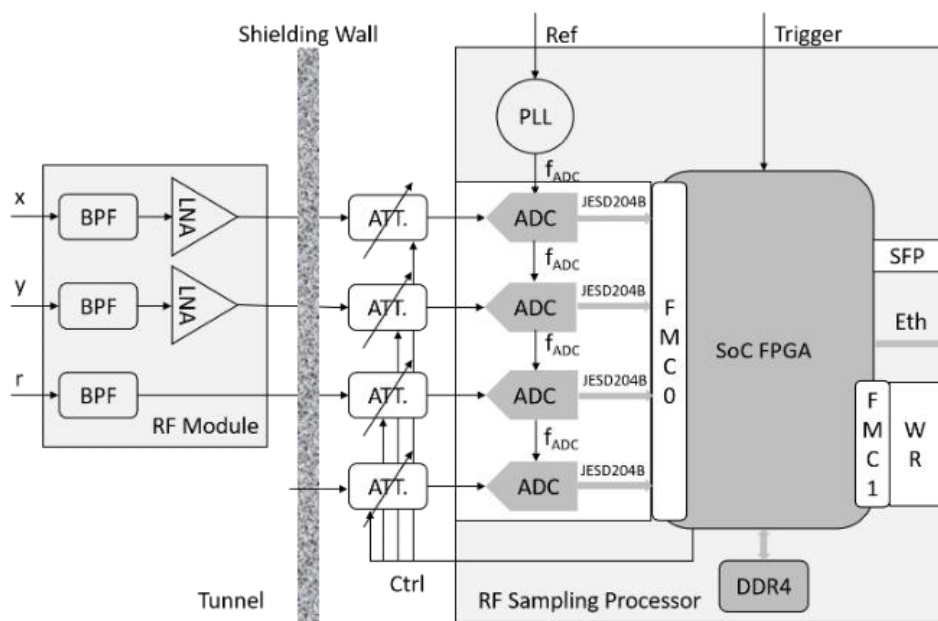


SBPM相对
分辨率
 1.66×10^{-4}

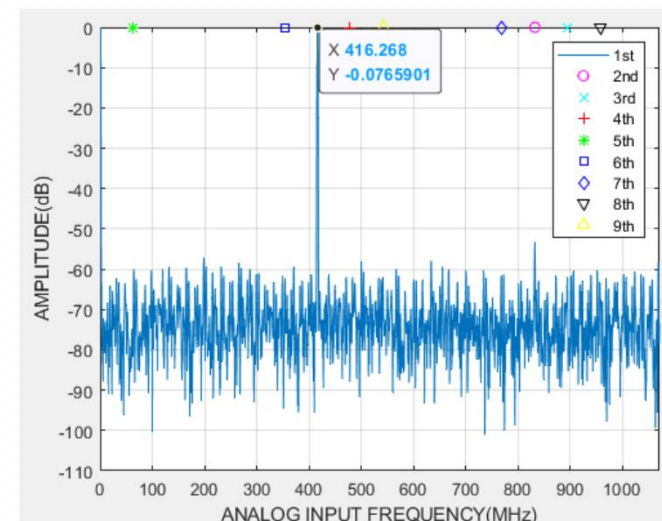


束流信号处理器

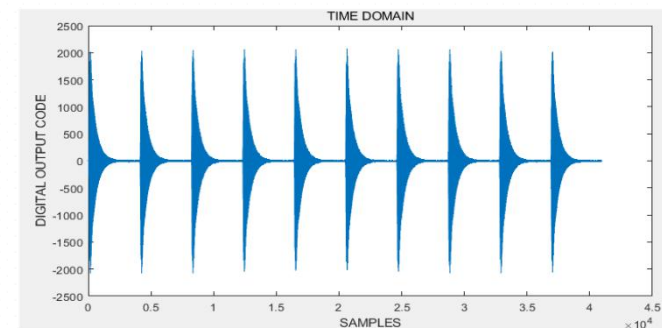
- ❑ 腔式探头的信号中心频率一般为几GHz，下变频至中频后采样
- ❑ 模拟前端包含放大、衰减、滤波、下变频等，结构复杂
- ❑ 对信号进行射频直接采样处理，可简化系统结构、提高系统性能



- 双通道9GHz模拟带宽
- 最高采样率2.6Gsp/s, 8lane
- 采样位数14位
- 有效位~8位@4.7GHz模拟输入
- 输入信号幅度1.0V_{PP}

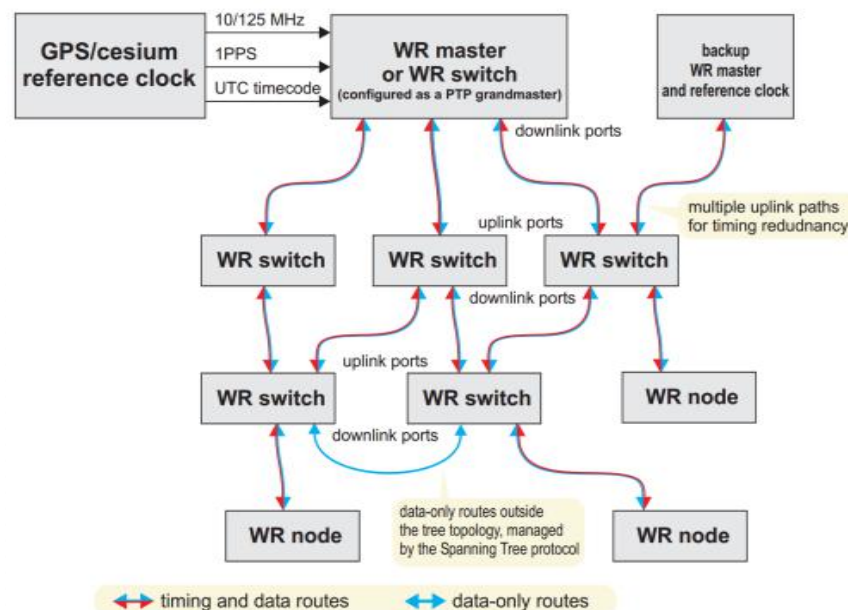


输入频率4.7GHz，采样率1.904GHz
ENOB=8.4



定时系统

- ❑ 为激光器、调制器、微波低电平、束流测量、光学测量等需要同步触发的设备提供精确的时钟脉冲信号（Trigger），以保证电子束团产生并被加速到设计能量，产生满足要求的自由电子激光，同时完成束流和光学参数测量
- ❑ 为束流测量、光学测量等系统提供硬件束团编号（Bunch ID），束流参数分析和设备故障分析的重要依据



节拍

定时系统

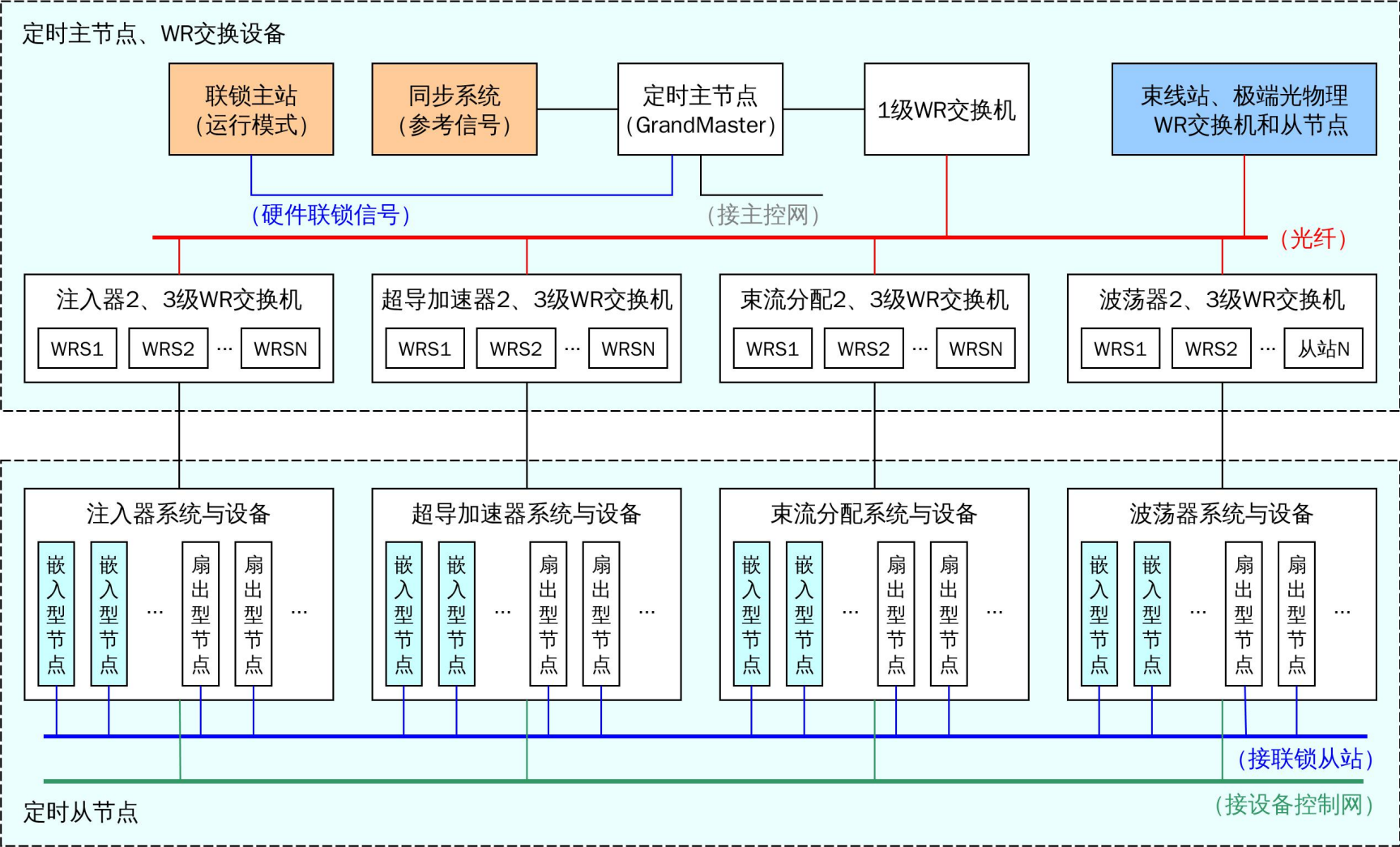
主从节点 + 传输网络
星型拓扑结构

三项功能

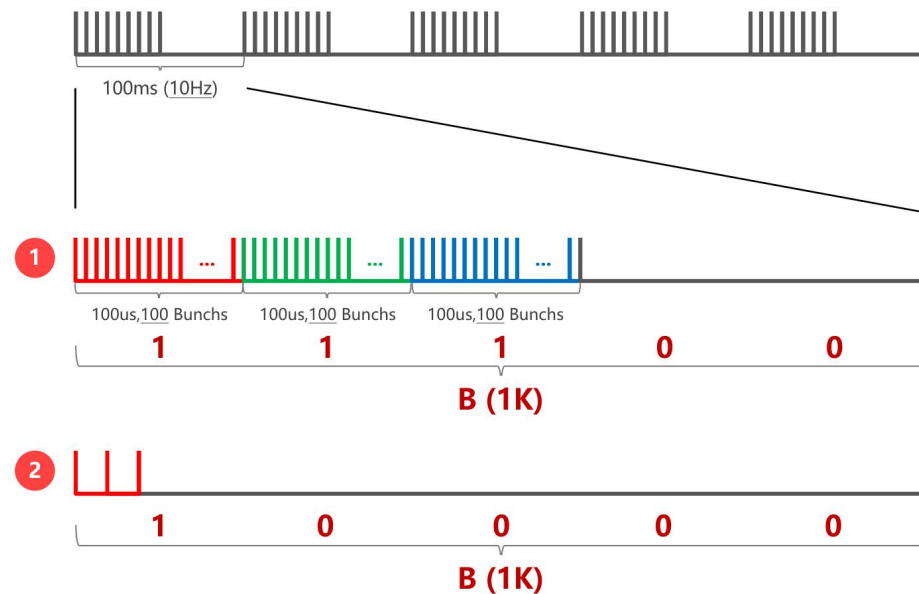
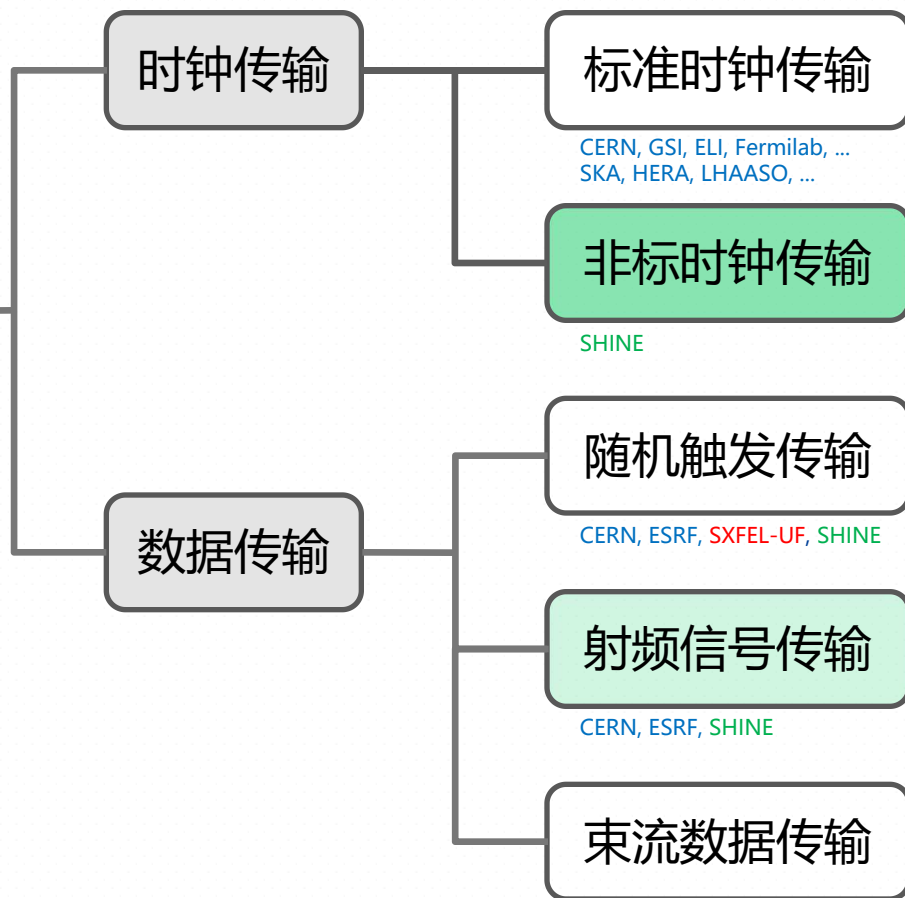
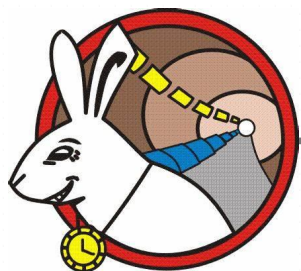
机器时钟传输
随机触发传输
束流数据传输

两类节点

嵌入型节点
扇出型节点

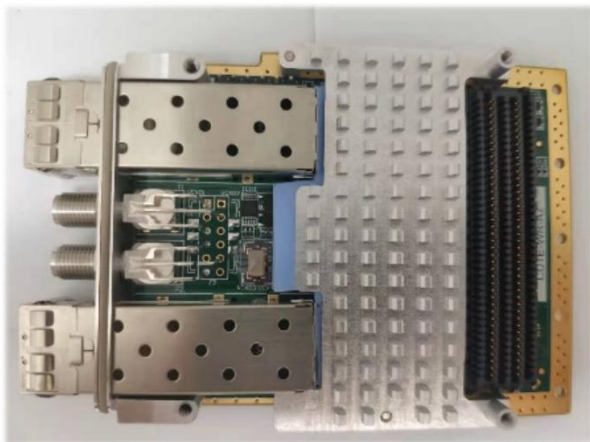


定时系统

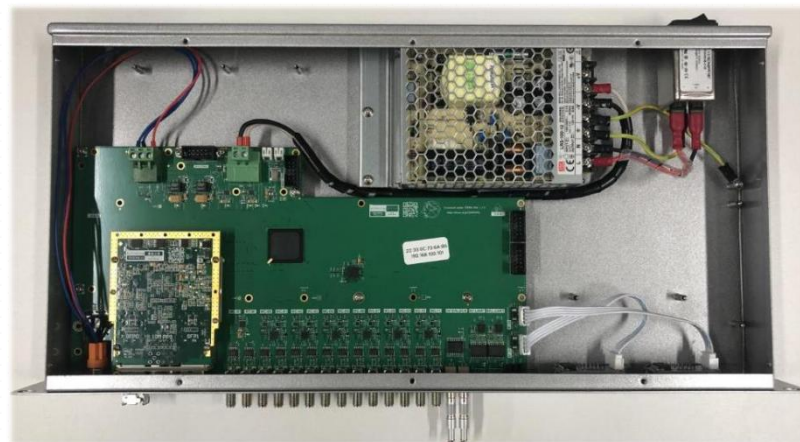
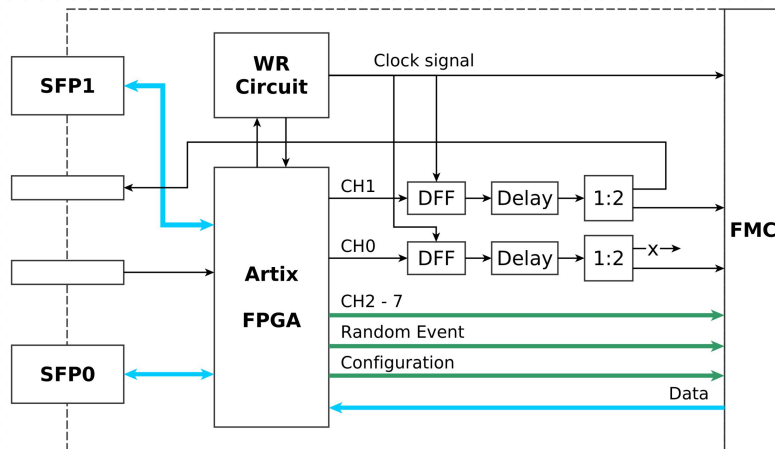


定时系统

- ❑ 标准WR设备，采用外部10MHz参考信号，倍频到125/62.5MHz作为基准工作频率
- ❑ 以1.0030864MHz的倍频作为物理层的通信载频，在节点恢复出与原始参考信号锁相的方波信号
- ❑ 基准工作频率选为64.197530MHz（倍频因数64），容易产生 2^N 分频
- ❑ 25MHz标准VCXO受PLL参数限制，只能实现若干离散频点（52/81）
- ❑ 三级WR交换机级联的情况下，节点间抖动好于5ps，与外部参考信号间抖动好于10ps



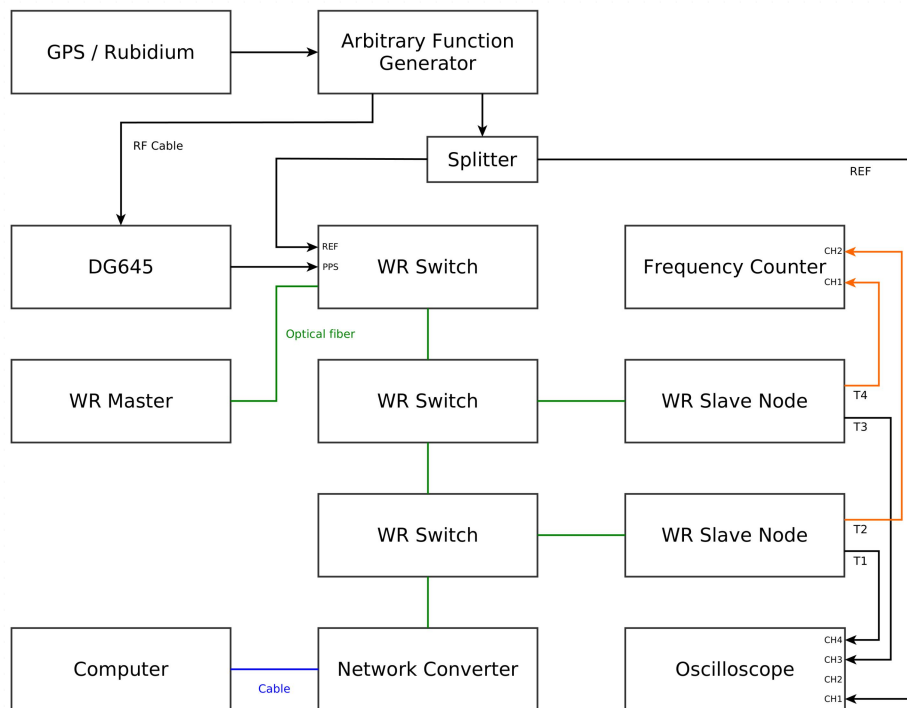
嵌入式节点 (FMC LPC)



扇出型节点

定时系统

❑ 目前唯一非标时钟运行的White Rabbit系统 (Beam-Synchronous Timing System)



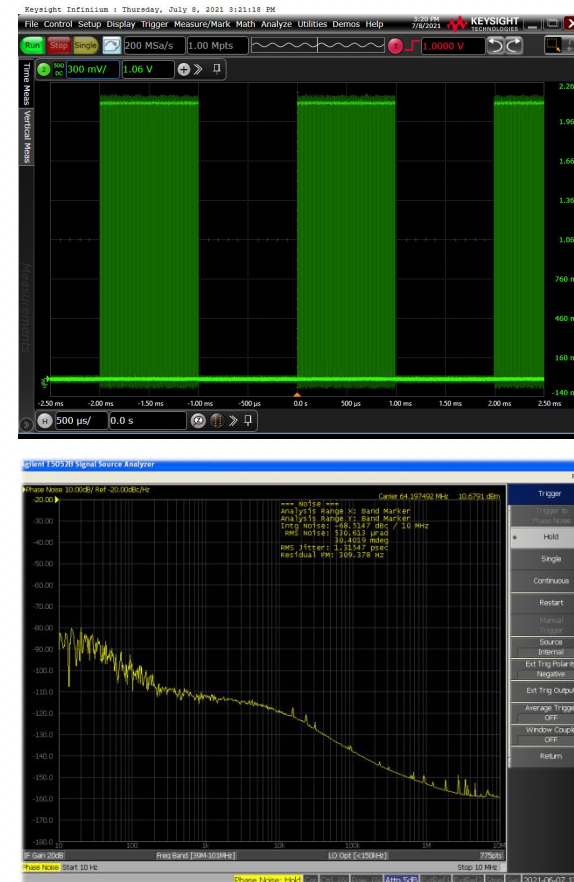
- 参考信号首选正弦信号，但因频率太低，难以用示波器测量相对抖动
- 方波信号易于相对抖动测量，但周期之间存在抖动，影响系统内同步



WR工作时钟相噪测试 ▶

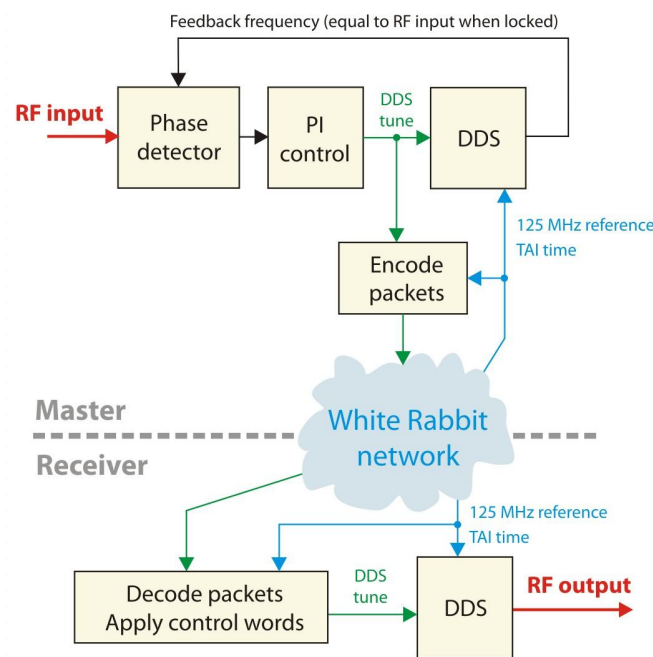
10Hz ~ 10MHz 积分抖动 <2ps

测试仪器: Agilent E5052B

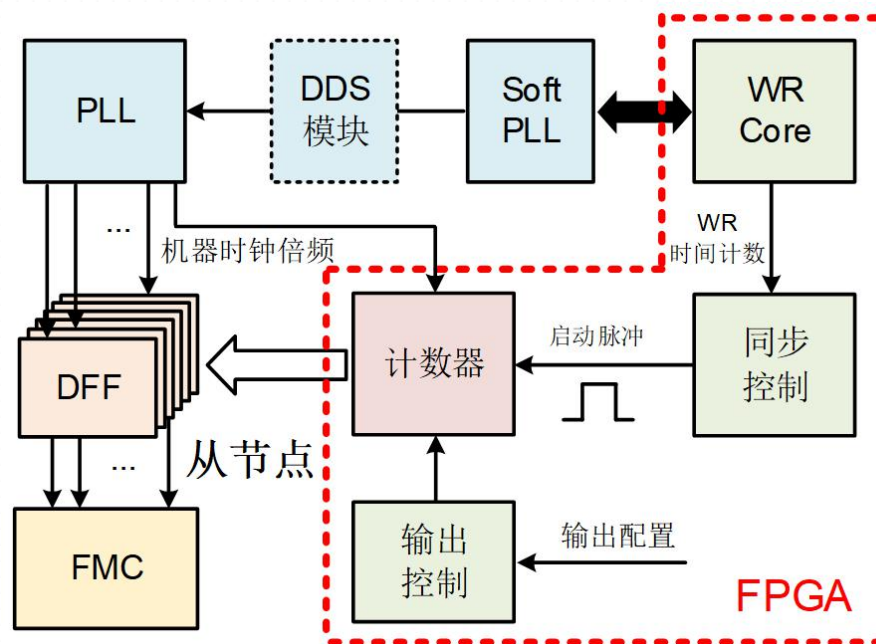


定时系统

- ❑ 基于标准WR网络进行时钟（125/62.5MHz）分发与同步方案
- ❑ WR传输频率、相位信息，通过DDS（直接数字频率合成）与片外D触发器实现脉冲编辑
- ❑ 延时方案：机器时钟采用片外延时，随机触发采用片内延时



WR-DDS原理框图



射频传输 + 脉冲编辑



主节点 & 从节点

小结

- ❑ 硬X射线自由电子激光装置 (SHINE) 正在建设, 已开始电子枪段设备安装和调试;
- ❑ 加速器测控系统实现对电子束流主要参数的在线监测, 及加速器各类设备的全面控制, 提供装置调试和运行的平台;
- ❑ 束流信号处理器用于BPM, BAM, BLM等信号的采样和处理, ADC最高采样率1GSa/s, 有效位好于10位, 可实现1MHz逐束团束流信号采集与处理;
- ❑ White Rabbit定时系统实现加速器同步时钟信号和束团编号信息的分发, 精度1ns, 抖动小于10ps。

小结

- ❑ 硬X射线自由电子激光装置 (SHINE) 正在建设, 已开始电子枪段设备安装和调试;
- ❑ 加速器测控系统实现对电子束流主要参数的在线监测, 及加速器各类设备的全面控制, 提供装置调试和运行的平台;
- ❑ 束流信号处理器用于BPM, BAM, BLM等信号的采样和处理, ADC最高采样率1GSa/s, 有效位好于10位, 可实现1MHz逐束团束流信号采集与处理;
- ❑ White Rabbit定时系统实现加速器同步时钟信号和束团编号信息的分发, 精度1ns, 抖动小于10ps。

感谢国内各合作单位对SSRF、SXFEL、SHINE项目的大力支持!

敬请批评指正