

# SHINE 束线站定时系统束团编号的数据采集

尹亮<sup>1</sup> 曾孟麒<sup>1</sup> 尹聪聪<sup>1,2</sup> 怀平<sup>1,2</sup>

1(上海科技大学 上海 200120)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

**摘要** 上海硬 X 射线自由电子激光装置 (Shanghai High Repetition rate XFEL (X-ray Free Electron Laser) and Extreme light facility, SHINE) 是一个高重频 XFEL 装置, 束线站定时系统需要为设备提供基于硬件的精确的 X 射线束团编号和定时触发。对于 SHINE 束线站单脉冲工作模式的设备, 采集数据包以及对对应时刻的束团编号信息, 便于后续实验数据分析。设计了一个束团编号采集的测试系统, 它基于 Zynq-UltraScale+ 型片上系统 (System-On-Chip, SOC) 搭建, 采用了白兔协议 (White Rabbit) 协议的定时系统环境。该测试系统通过 FPGA 夹层卡 (FPGA Mezzanine Card, FMC) 获取嵌入式节点的束团编号, 使用 LwIP (Light weight Internet Protocol) 协议搭建的 TCP 协议栈实现束团编号的采集。采用 Basler 相机对该系统进行了实验测试, 并使用 pypylon 库来采集相机的数据。实验测试结果表明: 该束团采集测试系统获得的束团编号数量和图像帧数相同, 可以满足 SHINE 束线站对于束团编号采集的需求。

**关键词** 定时, 上海硬 X 射线自由电子激光装置, 白兔协议, 束团编号

**中图分类号** TL503.6

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.060101

## Data acquisition of bunch IDs in timing system of SHINE beamlines and end stations

YIN Liang<sup>1</sup> ZENG Mengqi<sup>1</sup> YIN Congcong<sup>1,2</sup> HUAI Ping<sup>1,2</sup>

1(ShanghaiTech University, Shanghai 200120, China)

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

**Abstract** [Background] Shanghai High repetition rate XFEL (X-ray free electron laser) and Extreme light facility (SHINE) is a high-repetition-rate X-ray-free electron laser. The timing system of the beamlines and endstations must provide high-precision bunch IDs and a timing trigger for the equipment that works in single-pulse mode. [Purpose] This study aims to design a data acquisition (DAQ) testing system to simultaneously acquire X-ray bunch IDs with their corresponding detector data package for subsequent data processing. [Methods] This DAQ testing system was developed on the Zynq UltraScale+ system-on-chip (SOC), and the White Rabbit protocol was employed for the timing system environment. A Bunch ID obtained from the FPGA mezzanine card (FMC) of the embedded White Rabbit node (WRN) was transferred to the server using a TCP protocol stack built on LwIP (light weight internet protocol). Finally, a Basler camera was employed to test this DAQ system, in which the pypylon library was applied to raw data acquisition software for camera snapshot whilst two channels of data were collected by an upper computer and saved to a database for comparison. [Results & Conclusions] The number of bunch IDs obtained by this acquisition test system is the same as that of image frames taken by Basler camera, which demonstrates that the testing system can satisfy the requirements of bunch ID acquisition in SHINE beamlines and endstations.

**Key words** Timing, SHINE, White Rabbit protocol, Bunch ID

第一作者: 尹亮, 男, 1998 年出生, 2020 年毕业于大连理工大学, 现为硕士研究生, 研究领域为定时技术

通信作者: 尹聪聪, E-mail: v-yincc@shanghaitech.edu.cn

收稿日期: 2022-12-23, 修回日期: 2023-04-10

First author: YIN Liang, male, born in 1998, graduated from Dalian University of Technology in 2020, master student, focusing on timing technology

Corresponding author: YIN Congcong, E-mail: v-yincc@shanghaitech.edu.cn

Received date: 2022-12-23, revised date: 2023-04-10

上海硬 X 射线自由电子激光装置 (Shanghai High Repetition rate XFEL (X-ray Free Electron Laser) and Extreme light facility, SHINE) 是一台基于超导直线加速器的大型科学研究装置, 可以产生超高亮度、超短脉冲、波长可调的相干 X 射线, 在物理、化学、材料、生命科学等诸多领域都有非常广泛和极为重要的应用<sup>[1-2]</sup>。高重复频率的自由电子激光装置对定时系统的可靠性和准确性提出了更高的要求, 并且单脉冲实验对定时提出了很大的挑战。

定时系统作为整个硬 X 射线自由电子激光运行的时钟, 精准控制着 SHINE 所有需要同步触发的设备, SHINE 的 3 条光束线和 10 个实验站具体数十个需要定时信号的设备, 典型的包括在线成像的 Camera、波前测量装置、硬 X 射线能谱仪、脉冲能量诊断设备、丢束检测设备、脉冲时间诊断设备、THz 脉冲宽度测量设备及高重频面探测器等。SHINE 束线站定时系统有两个基本功能: 一是能够准确接收加速器提供的定时信号并将定时信号通过交换机发送到各条束线站; 二是为束线站设备提供统一的时钟脉冲信号以及束团编号, 使设备产生带有时间标签的物理实验数据, 方便后续通过统一的时间标签来对实验数据进行分析以及管理, 束团编号对束流的参数分析也具有重大的作用。考虑到定时系统的需求, 触发信号抖动的设计指标要小于 30 ps。

国内外的大型物理实验装置已经实现了多种定时触发系统, 主要包括基带分布系统、事件分布系统以及 White Rabbit 定时系统等<sup>[3]</sup>。基带分布系统是脉冲信号直接通过从源端发送到输出端, 但是需要使用昂贵的稳相光纤才能达到比较好的时钟准确性, 是比较陈旧的技术; 事件分布系统是将事件码从事件发生器经扇出模块以广播的形式发送到事件接收端, 在事件接收端根据事件码产生对应的脉冲信号用以触发目标设备工作<sup>[4-6]</sup>。上海同步辐射光源、北京正负电子对撞机 II 期、瑞士 X 射线自由电子激光 (SwissFEL)、合肥先进光源等都采用了事件定时

系统<sup>[7-11]</sup>; White Rabbit 定时系统是基于标准以太网的时钟同步技术, 在 2008 年由欧洲核子中心 (European Organization for Nuclear Research, CERN) 和全球解决方案倡议组织 (The Global Solutions Initiative, GSI) 联合提出, 能够实现同步精度好于 100 ps, 同步准确度好于亚纳米量级<sup>[12-14]</sup>。在兰州重离子加速器的束流位置测量 (Beam Position Monitor, BPM) 以及大型高海拔空气簇射观测站项目 (Large High Altitude Air Shower Observatory, LHAASO) 中都被采用<sup>[15-16]</sup>。

SHINE 定时系统的频率为 1.003 086 MHz, 事件分布系统和标准的 White Rabbit 定时系统 (采用 125 MHz 基准时钟) 都不能满足需求, 需要采用自定义频率的 White Rabbit 方案 (采用 1.003 086 MHz 的基准时钟) 来实现<sup>[17]</sup>。SHINE 定时系统开发了原型系统, 能够实现同步触发信号传输、随机事件触发传输以及从节点之间数据的交互<sup>[18]</sup>。SHINE 定时系统将成为国内第一个具备实时提供束团编号的定时系统, 来为探测器数据分析、束流检测提供依据。

本文在现有研究的基础上, 基于 White Rabbit 的束团编号数据采集方案, 通过对定时系统的物理需求分析, 完成了定时束团编号采集软件开发和测试, 奠定了采集数据打上全局高精度束团编号的基础。

## 1 背景

SHINE 束线站的定时系统采用 White Rabbit 技术, 束线站的定时参考信号由加速器定时系统提供, 是一个频率为 1.003 086 MHz (1 300 MHz 的 144×9 分频的频率) 的脉冲信号。如图 1 所示, 该脉冲信号输入到定时系统的主节点中, 再通过交换机 (White Rabbit Switch, WRS) 扇出到对应的从节点 (White Rabbit Node, WRN), 从节点包括了两种类型的嵌入式从节点和扇出型从节点。扇出型从节点提供脉冲

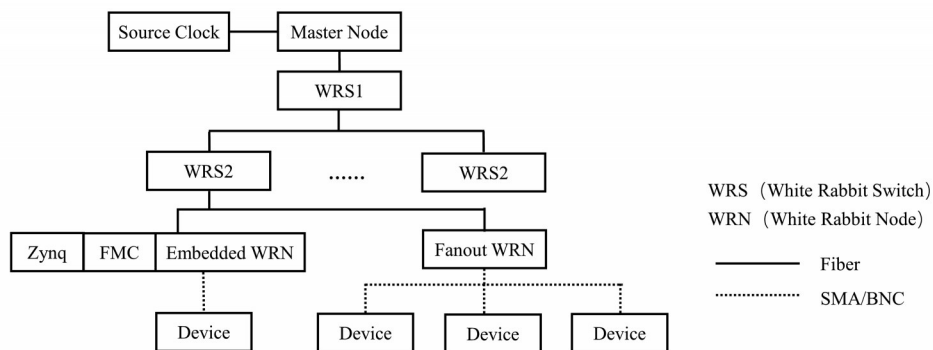


图 1 SHINE 束线站定时系统架构  
Fig.1 Framework of timing system for SHINE beamlines and endstations

触发信号,用于触发不需要束团编号的探测器。嵌入式从节点同时提供脉冲触发信号和束团编号,用于触发需要时间标签的单脉冲工作探测器。加速器的每一个束团都有对应的束团编号,在从节点可以通过设置束团簇的重复频率、束团簇中的有效束团、束团簇掩码来实现特定频率的脉冲信号。

## 2 定时束团编号的方案

SHINE 目前考虑使用 WRS 交换机、WRN 嵌入式从节点以及 WRN 扇出型从节点来实现定时系统。一级 WRS 交换机用来接收来自外部的时钟源或者自身的 T0 基准触发信号,通过 18 路输出信号将 T0 扇出至二级 WRS 交换机,二级 WRS 交换机再将信号扇出到从节点,如图 2 所示。

从节点包括 WRN 扇出型从节点,连接不需要束团编号,只需要脉冲信号驱动的探测器;WRN 嵌入式从节点,连接需要束团编号以及时序驱动的探测器。WRN 扇出型从节点将输入信号扇出到 10 路输出信号,通过 SMA 接口驱动设备工作。WRN 嵌入式从节点是一块 FPGA 夹层卡(FPGA Mezzanine Card, FMC)子板,需要连接在载板上才能正常工作。

定时系统需要保证触发信号的精准性,交换机和从节点之间采用单模光纤进行连接,由于不同长度的光纤会带来不同的延迟,需要在标定阶段去测

试光纤的不对称系数,来补偿光纤长度对延迟的影响。同时,交换机和从节点的小型可插拔(Small Form Pluggable, SFP)模块在发送信号和接收信号时也会有延迟,这部分延迟也需要在标定阶段进行补偿。通过标定,能够保证每一路扇出信号的时间同步,保证各子系统在相同时刻接收到触发信号。

为了验证束线站定时系统的设计方案,本文在实验室搭建束团编号采集的测试系统,开展嵌入式节点的束团编号采集测试研究。定时系统的测试系统由一级 WRS 交换机、二级 WRS 交换机、嵌入式从节点、束团编号采集载板、Basler 相机等组成。一级 WRS 交换机能够为整个系统提供 1.003 086 MHz 的时钟信号,Basler 相机作为单脉冲触发的光束成像探测器,同时需要脉冲信号和束团编号。嵌入式从节点的触发信号被分为两路,一路通过 MC-1 的 SMA 口输出信号给 Basler 相机,Basler 相机可以根据晶体管晶体管逻辑(Transistor Transistor Logic, TTL)电平上升沿触发其图像数据采集,并将采集数据发送到上位机。同时嵌入式从节点可以通过 FMC 接口与载板之间进行通信,载板实现了 MC-1 上升沿时刻对应束团编号的采集,并将采集的束团编号通过 Zynq 搭建的 TCP 以太网传输到上位机。上位机将采集的束团编号与相机图像保存在数据库,每一个图像都有唯一标识的束团编号。

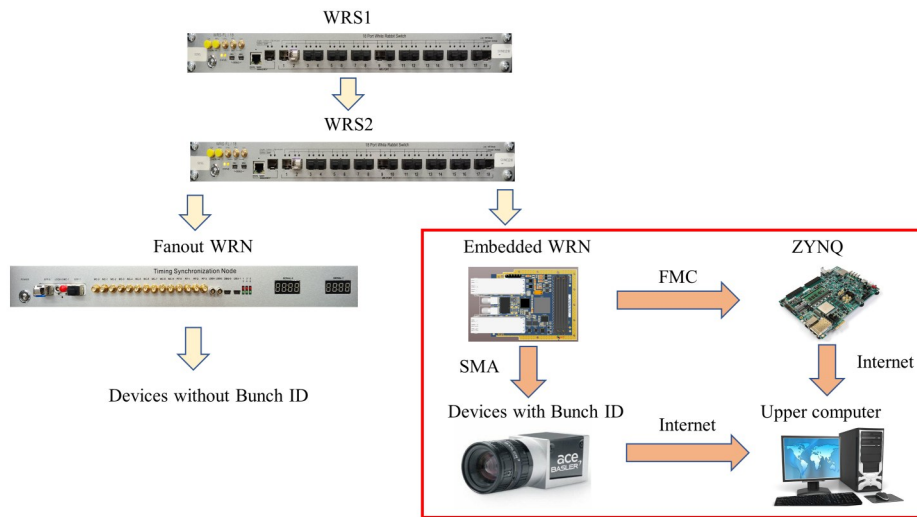


图 2 SHINE 束线站定时束团编号数据采集方案  
Fig.2 Bunch ID acquisition scheme of SHINE beamlines and endstations

## 3 系统设计

束线站束团编号的采集测试系统总体设计框图如图 3 所示,开发内容包括两部分:采集系统的软件开发和上位机软件开发。

### 3.1 束团编号采集系统的设计

在 SHINE 束线站的束团编号数据采集电子学中,主要采用 Xilinx 公司设计的 ZCU106 数据采集板,该采集板基于 Zynq-UltraScale+ 芯片。Zynq-UltraScale+ 芯片分为 PS(Processing System)端和 PL

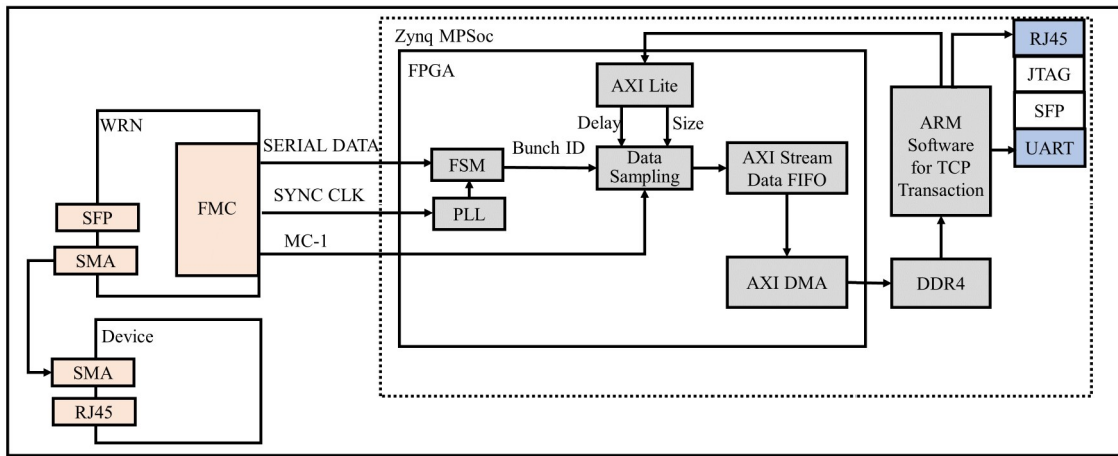


图3 SHINE束线站数据采集框图  
Fig.3 Block design of data acquisition scheme of SHINE beamline station

(Programmable Logic)端,其中PS端是ARM,PL端是FPGA。Zynq负责多项任务,主要包括了嵌入式子板的供电;Bunch ID的解码、采样、处理、传输;基于LwIP(Light Weight)的TCP以太网传输。根据需求在Zynq-UltraScale+芯片的PL端进行固件开发,在Vivado 2020.1使用Verilog硬件描述语言编写逻辑;在PS端编写数据传输的裸机开发,在Vitis 2020.1使用C语言编写TCP的数据传输协议栈。

在每个束团周期内,嵌入式WRN从节点通过FMC向载板的FPGA发送SYNC CLK同步时钟和Serial data编码信息,载板可以直接使用WRN提供的Sync Clock作为系统时钟或者通过PLL来作后续处理。编码信息在SYNC CLK的时钟上升沿发生跳变,在一个周期发送1 bit,包含的信息有束团编号(当前机器时钟脉冲对应的束团编号,为48 bits)、RT-x(当前机器时钟周期内是否有随机触发)、MC-x(当前机器时钟周期内触发信号是否存在)。将编码信息经过状态机(Finite State Machine,FSM)解码,可以得到每一个时钟周期的束团编号。

嵌入式WRN从节点只有一路信号MC-1被引出到前面板,MC-1信号被分为两路信号,一路信号通过子板的SMA口输出给外部探测器进行硬件触发,另外一路信号通过FMC输出给载板。载板的Data Sampling模块接收MC-1信号、SYNC CLK信号和束团编号Bunch ID,通过SYNC CLK时钟采样并解析束团编号。对MC-1进行边沿检测,采样MC-1上升沿时刻对应的束团编号,通过AXI-Stream协议将束团编号发送到AXI Stream Data FIFO模块。Data Sampling模块受到AXI Lite模块发送的size信号和delay信号的控制,delay用于束团编号的延时修复,方便对束团编号进行调整;size是每轮DMA(Direct memory access)的数据量,当设为

1 024时,即每次采集到1 024个数据时完成一次DMA发送。AXI Stream Data FIFO模块负责将接收的数据以FIFO的形式保存下来,当累计的数据量达到size后,发送给AXI DMA模块,AXI DMA模块将FPGA采集的数据发送到Zynq的PS端DDR4(Double-Data-Rate Fourth Generation)。

在Zynq的PS端,可以采用裸机下的LwIP协议,这是一个轻量级的以太网协议栈,它能够快速搭建TCP以太网,将PL发送到PS端DDR4中的数据封装成TCP包。TCP数据包将通过RJ45连接到电脑,最终通过上位机进行束团编号的采集。同时,在PS端可以通过串口来收发数据,修改AXI Lite模块中的size和delay数值。

### 3.2 上位机软件设计

本测试系统采用Basler相机作为硬件触发的探测器,开发相关的上位机应用程序。上位机软件开发采用Python语言,基于PyQt的GUI应用程序工具包编写上位机软件。该软件需要实现的功能包括嵌入式子板的MC-1信号通过SMA传输给相机,通过串口发送命令对Zynq的size和delay进行初始化配置,使得数据采集按照预定的模式来工作。

上位机软件使用两线程,其中一路线程使用Socket套接字接收Zynq发送的TCP包并进行解析,能够采集Zynq发送的束团编号;另一路线程采用Basler相机的pypylon库驱动相机工作,并将相机采集图片保存。上位机能使用Begin按钮开启数据采集,使用Stop按钮关闭数据采集。

Basler相机采集每张图片都有序号,每采集一张图片序号增加。束团编号的TCP包头带有帧号,每发生一轮TCP传输,帧号也会增加。相同频率的脉冲触发下,采集的相邻束团编号差值是固定的。

当相机采集的图片序号不连续、TCP 发生帧号丢失、采集的相邻束团编号差值变化时,说明采集的数据有丢包情况,将出现丢包的数据进行丢弃。

应用程序逻辑如图 4 所示,最终采集的束团编号以及图片路径都保存到 MySQL 数据库中。

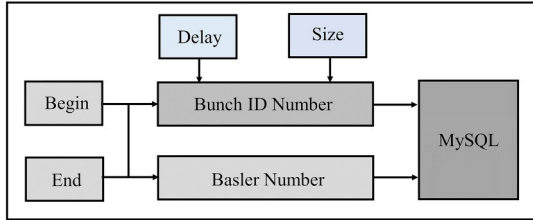


图 4 应用程序逻辑图

Fig.4 Logic diagram of application program

## 4 测试功能验证

### 4.1 信号同步

如图 5 所示,测试环境使用 WRS 交换机、WRN 嵌入式节点、WRN 扇出型节点、Zynq 以及 Basler 相机来搭建。WRN 嵌入式节点是实现了 White Rabbit 协议的通用 FMC 标准子卡,可以给 FMC 载板提供

同步准确度好于 1 ns,同步抖动小于 30 ps 的时钟信号。实验室使用的载板是一块 ZCU106,能够帮助快速搭建高速数据采集的平台,包括了四核 ARM Cortex-A53 应用处理器以及双核 Cortex-R5 实时处理器以及 ZU7EV 器件。

SHINE 束线站定时系统需要满足时钟信号精度达到 1 ns,晃动小于 30 ps。在实验室搭建测试环境,第一台 WRS 交换机作为一级交换机,发送 1.003 086 MHz 的同步时钟信号;第二台 WRS 交换机作为二级交换机,接收一级交换机的时钟信号,并通过光纤传送给 WRN 嵌入式节点和 WRN 扇出型节点。

一级交换机输出的伪秒脉冲(False Pulse Per Second, FPPS)信号作为 T1,二级交换机输出的 FPPS 信号作为 T2,WRN 嵌入式节点的 MC-1 输出信号作为 T3,WRN 扇出型节点的 MC-1 输出信号作为 T4。将 T1、T2、T3、T4 接入示波器,其中 T1 为示波器的触发信号,对 4 路信号进行了测试。如图 6 所示,T1 与 T3、T1 与 T4 的时间信号精度能够保证在 50 ps 左右,晃动能够达到 10 ps 以内,满足设计的需求。



图 5 SHINE 定时系统测试系统图片

Fig.5 Photo of testing system of SHINE timing system

### 4.2 束团编号采集功能验证

嵌入式 WRN 子节点的 SMA 信号可以触发 Basler 相机进行图像采集,实验室使用的 Basler 相机型号是 acA2440-20gm,能够在束线站上用来监控光路。Basler 相机的工作频率受限,可以通过串口配置嵌入式从节点使其输出频率为 10.030 86 Hz 的脉冲信号,SMA 连接光电耦合 I/O 输入线路 Line1,在 MC-1 时钟上升沿将会硬件触发相机采集图片。

在实验室条件下,对数据采集系统进行了测试验证。实验中使用上位机发送串口命令设置束团编号采集的 size 和 delay,如图 7 所示,其中 size 的数值

设置为 1 024,delay 的数值设置为 0。当上位机开始工作时,每当定时系统的 MC-1 的触发到来时,一路子线程采集 Bunch ID 并将数据保存在数据库中,上位机的 BunchID number 将显示采集束团编号的数量;另一路子线程采集硬件触发的 Basler 相机图像,并将图像路径保存在数据库中,上位机的 Basler number 将显示采集图像的数量。如果上位机未出现丢包的情况,那么采集的 Bunch ID 数量将与图像帧数相同。

通过多轮实验测试,BunchID number 和 Basler number 始终保持相同,说明采集的 Bunch ID 和图像帧数相同,没有出现丢包的情况,满足设计的需求。



图6 SHINE 定时系统时间延迟测试结果截图  
Fig.6 Snapshot of testing results of the time delay of the SHINE timing system

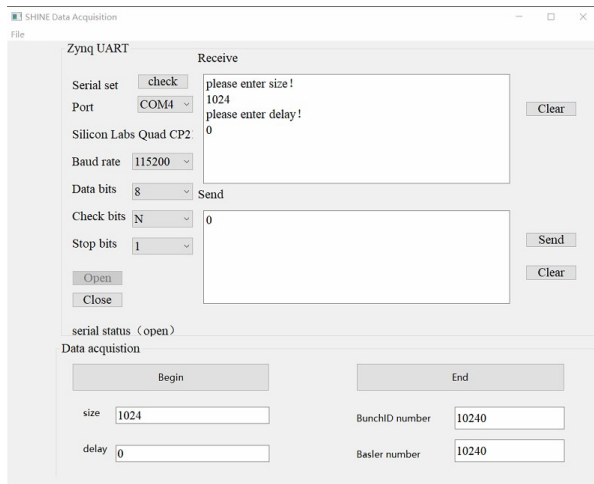


图7 采集数据界面  
Fig.7 User interface of data acquisition

## 5 结语

本文基于 White Rabbit 协议的硬件设备, 搭建了定时 Bunch ID 采集测试系统, 采用 Xilinx 的 Zynq 搭建了采集电子学系统, 使用 Basler 相机进行测试。结果显示, 该套定时系统实现了相机硬件触发时采集的图像和束团编号的对应。定时系统的束团编号采集是硬 X 射线自由电子激光光束线的关键技术之一, 本文搭建的采集系统开发周期较短, 便于修改, 并且可以应用到束线站其他类型的单脉冲探测器, 为今后各种类型探测器的束团编号采集提供了基础, 后续将对其他探测器进行进一步的开发。

**作者贡献声明** 尹亮负责系统软件的开发, 参与实验硬件环境搭建, 参与研究过程和问题讨论, 论文撰写和修改; 曾孟麒参与研究问题和问题讨论; 尹聪聪

负责 SHINE 束线站定时系统的工程设计、技术路线制订与平台建设, 论文修改指导; 怀平负责 SHINE 束线站定时系统总体目标的设计、项目管理, 论文修改指导, 研究经费支持。

## 参考文献

- 赵振堂, 冯超. X 射线自由电子激光[J]. 物理, 2018, 47(8): 481 - 490. DOI: 10.7693/wl20180801.  
ZHAO Zhentang, FENG Chao. X-ray free electron lasers [J]. Physics, 2018, 47(8): 481 - 490. DOI: 10.7693/wl20180801.
- Li K, Deng H X. Systematic design and three-dimensional simulation of X-ray FEL oscillator for Shanghai Coherent Light Facility[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 895: 40 - 47. DOI: 10.1016/j.nima.2018.03.072.
- 李成. 大型物理实验装置高精度时间同步技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.  
LI Cheng. The research on the timing synchronization technology with high precision for large scale physics experiments[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- 赵黎颖, 殷重先, 刘德康. 事件系统在 SSRF 主定时系统中的应用[J]. 核技术, 2006, 29(1): 1 - 5. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-3219.2006.01.001.  
ZHAO Liying, YIN Chongxian, LIU Dekang. Application of event system in SSRF timing system[J]. Nuclear Techniques, 2006, 29(1): 1 - 5. DOI: 10.3321/j.issn: 0253-

- 3219.2006.01.001.
- 5 刘鸣, 殷重先, 赵黎颖, 等. 新型定时系统设计[J]. 核技术, 2010, **33**(6): 425 - 428.  
LIU Ming, YIN Chongxian, ZHAO Liying, *et al.* Design of a novel timing system[J]. Nuclear Techniques, 2010, **33** (6): 425 - 428.
  - 6 雷革, 徐广磊, 汪林, 等. BEPCII 事件定时系统[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 451 - 455, 469. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001).  
LEI Ge, XU Guanglei, WANG Lin, *et al.* BEPCII event timing system[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(3): 451 - 455, 469. DOI: [10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.001).
  - 7 Kalantari B, Biffiger R. SwissFEL Timing system: first operational experience[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Barcelona, Spain, October 8-13, 2017: 232 - 237.
  - 8 Liu F, Lei G, Duan Z, *et al.* The design of HEPS global timing system[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, **5**(3): 379 - 388. DOI: [10.1007/s41605-021-00257-6](https://doi.org/10.1007/s41605-021-00257-6).
  - 9 Li X, He X Y, Wang Z Y, *et al.* Conceptual design and theoretical analysis of a system: the reference network of alignment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2021, **1011**: 165582. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165582](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165582).
  - 10 Wang W X, Li C, He Z G, *et al.* Commissioning the photocathode radio frequency Gun: a candidate electron source for Hefei Advanced Light Facility[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(3): 23. DOI: [10.1007/s41365-022-01000-6](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01000-6).
  - 11 翟港佳, 孙晓康, 宣科, 等. 合肥先进光源定时系统设计[J]. 核技术, 2022, **45**(12): 120102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102).  
ZHAI Gangjia, SUN Xiaokang, XUAN Ke, *et al.* The design of Hefei advanced light facility timing system[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(12): 120102. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102).
  - 12 Dierikx E F, Wallin A E, Fordell T, *et al.* White Rabbit precision time protocol on long-distance fiber links[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, **63**(7): 945 - 952. DOI: [10.1109/TUFFC.2016.2518122](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2518122).
  - 13 Goujon G, Broquet A, Janvier N. Refurbishment of the ESRF accelerator synchronisation system using White Rabbit[C]//Proceedings 16th International Conference on Accelerators and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'17). 2017: 224 - 228.
  - 14 Lipiński M, Włostowski T, Serrano J, *et al.* White Rabbit: a PTP application for robust sub-nanosecond synchronization[C]//2011 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. September 12-16, 2011, Munich, Germany. IEEE, 2011: 25 - 30. DOI: [10.1109/ISPCS.2011.6070148](https://doi.org/10.1109/ISPCS.2011.6070148).
  - 15 李维龙. WR 定时系统在 BPM 采集系统中的实现[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2020.  
LI Weilong. Implementation of WR timing system in BPM acquisition system[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
  - 16 Du Q, Gong G H, Pan W B. A packet-based precise timing and synchronous DAQ network for the LHAASO project[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, **732**: 488 - 492. DOI: [10.1016/j.nima.2013.05.135](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.05.135).
  - 17 Ye Y, Li H, Li J, *et al.* Timing system based on customized frequency White Rabbit network in SHINE [J]. Journal of Instrumentation, 2022, **17**(9): T09009. DOI: [10.1088/1748-0221/17/09/t09009](https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/09/t09009).
  - 18 Yu P X, Yan Y B, Gong G H, *et al.* Prototype of White Rabbit based beam-synchronous timing systems for SHINE[ED/OL]. [2021-10-29]. <https://inspirehep.net/files/cfe3cffc637d15156dfac3d1843cbb02>.