

合肥先进光源定时系统设计

翟港佳 孙晓康 宣科 陈留国 李川 刘功发

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)是基于衍射极限储存环的第四代同步辐射光源。定时系统采用事件定时技术方案,主要向HALF装置的注入器、储存环和光束线等提供触发信号,协调注入和束流测量工作,实现对储存环任意束团的填充。装置中设备的触发信号抖动要求小于30 ps,同时要降低由光纤长度变化引起的信号漂移。针对以上设计要求,基于芬兰Micro-Research Finland Oy(MRF)公司的MTCA.4总线硬件完成了定时系统的设计,并在此基础上完成了软件控制程序的开发以及原型系统的性能测试。测试结果表明,触发信号的抖动小于24 ps,经延迟补偿后的信号漂移控制在3 ps左右,达到了HALF定时系统的设计要求。

关键词 HALF, 定时系统, 任意束团填充, MTCA.4

中图分类号 TL503.6

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.120102

The design of Hefei advanced light facility timing system

ZHAI Gangjia SUN Xiaokang XUAN Ke CHEN Liuguo LI Chuan LIU Gongfa

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract [Background] Hefei Advanced Light Facility (HALF) is a fourth-generation synchrotron radiation light source based on diffraction-limited storage ring. The timing system provides trigger signals for the HALF injector, storage ring and beamline, coordinates injection and beam measurement, and achieves filling of the storage ring bucket with any designated bunch pattern. [Purpose] This study aims to design a timing system for HALF to reduce the trigger signal jitter of the HALF device to less than 30 ps, and stabilize the signal drift caused by the optical fiber length change. [Methods] Based on the MTCA.4 event-driven products from Micro-Research Finland Oy (MRF), the event timing technology scheme was adopted to implement the timing system. Appropriate system frequencies for electron gun, microwave system and storage ring were selected to achieve different modes of storage ring bucket filling scheme. The timing system software was developed under Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) to coordinate with the control system of HALF, including an EPICS driver, database records, and operation interfaces. Delay compensation was applied to signal drift caused by the variation of optical fiber length. Finally, a prototype of the timing system was developed for performance tests. [Results & Conclusions] The results show that the jitter of the trigger signal is less than 24 ps, and the signal drift is controlled at about 3 ps after delay compensation, both meet the design requirements of HALF timing system.

Key words HALF, Timing system, Arbitrary bucket filling, MTCA.4

中国科学院人才支撑体系专项(No.KY2310000044)资助

第一作者: 翟港佳, 女, 1997年出生, 2020年毕业于安徽大学, 现为硕士研究生, 研究领域为加速器控制技术

通信作者: 李川, E-mail: lichuan@ustc.edu.cn

收稿日期: 2022-07-25, 修回日期: 2022-09-21

Supported by the Special Project of Talent Support System of Chinese Academy of Sciences (No.KY2310000044)

First author: ZHAI Gangjia, female, born in 1997, graduated from Anhui University in 2020, master student, focusing on accelerator control technology

Corresponding author: LI Chuan, E-mail: lichuan@ustc.edu.cn

Received date: 2022-07-25, revised date: 2022-09-21

合肥先进光源(Hefei Advanced Light Facility, HALF)是由国家同步辐射实验室(National Synchrotron Radiation Laboratory, NSRL)提出的第四代衍射极限同步辐射光源。HALF主要包括注入器、储存环和光束线等部分。如图1所示,注入器的满能量为2.2 GeV,储存环的周长为480 m,储存环的电子束能量为2.2 GeV^[1-3]。

定时系统的主要功能是向装置中的多种被控设备提供具有特定时序关系的触发信号,使它们协调一致地工作,实现储存环的任意束团填充。定时系统触发的设备包括:注入器的电子枪、微波系统和束流测量系统,储存环的注入系统、高频系统,光束线站。图2为各子系统收到定时系统触发后实际工作顺序示意图,由于各子系统工作原理不同,收到定时系统的触发信号的时间与该系统实际工作时间的延时不同,定时系统可以通过改变触发时间来保证各子系统按照设定时间工作。在束团的填充过程中,要求较高的触发信号的稳定性,以满足各子系统正

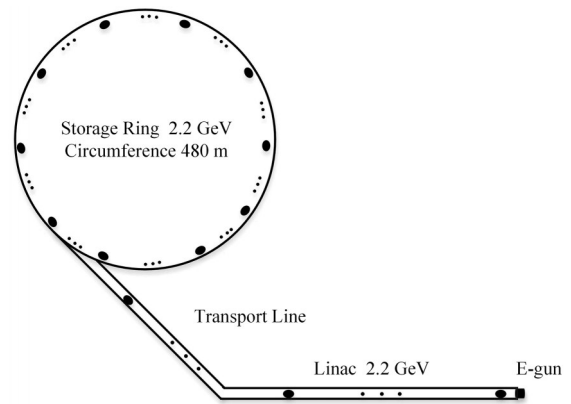


图1 HALF装置的布局图
Fig.1 Layout of HALF

常工作的需求,据此提出触发信号抖动的设计指标要小于30 ps。为了保证定时系统能够长期稳定地运行,要降低因光纤长度变化导致的触发信号漂移。表1列出了HALF定时系统的设计指标。

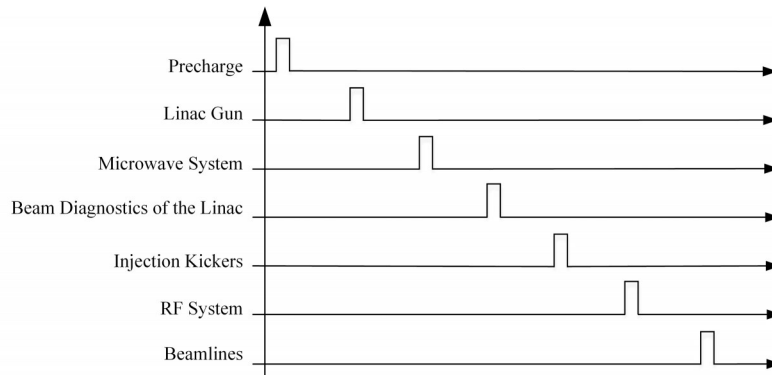


图2 各子系统收到定时系统触发后实际工作顺序示意图(横轴仅代表时间先后顺序)

Fig.2 Schematic diagram of the actual working sequence of each subsystem after receiving the trigger from the timing system (the horizontal axis only represents the chronological order)

表2列举了近期建成或者正在建设的大型粒子加速器装置定时系统的技术路线^[4-10],包括第四代同步辐射光源和自由电子激光装置。由表2可知,目前应用的定时技术主要有2种:事件定时技术(Event Timing)和白兔定时技术(White Rabbit, WR),两者均可以满足第四代同步辐射光源和自由电子激光装置的定时需求。事件定时技术相对于WR发展得更早也更成熟,所以在大型粒子加速器装置中的应用更广泛。

为了实现储存环的束团注入,定时系统需要传输高频系统的时钟信号。事件定时技术通过可调节的事件流传输频率,可以直接传输满足HALF设计需求的特定高频频率^[11]。而WR采用固定的125 MHz基准时钟,当传输特定频率的高频信号时还需要基于RF over Ethernet(RFoE)模块做进一步

表1 HALF定时系统的设计指标

Table 1 Design specifications of HALF timing system

触发信号的抖动	<30 ps
Jitter of trigger signals	
触发信号延迟的调节步长	<10 ns
Delay adjustment length of trigger signals	
触发信号延迟的范围	≥1 s
Delay range of trigger signals	
触发信号脉宽的调节步长	20 ns
Pulse width adjustment length of trigger signals	
触发信号脉宽的范围	≥60 μs
Pulse width range of trigger signals	

的分布式DDS(Direct Digital Synthesis)功能模块开发^[6]。考虑到HALF的建设工期较紧,HALF定时系统采用事件定时技术方案。在分布式触发设备的基础上,为注入器的电子枪、微波系统,储存环的高频

表2 第四代同步辐射光源和自由电子激光装置定时系统
Table 2 The timing system of some accelerator facilities

装置 Facilities	技术路线 Technical route	建成年份 Completion date of construction
MAX IV	Event timing	2016
Sirius	Event timing	2019
ESRF-EBS	White Rabbit	2019
HEPS	Event timing	建设中 Under construction
APS-U	Event timing	建设中 Under construction
SHINE	White Rabbit	建设中 Under construction

系统选择合适的工作频率,满足各子系统协调工作的定时需求,以实现不同的束团填充模式。HALF 控制系统是基于实验物理和工业控制系统 (Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS) 的分布式系统,因此基于 EPICS 架构开发了定时系统软件,包括驱动程序、实时数据库和操作界面。本文详细描述了系统开发过程,在原型系统上验证了系统的触发功能,并测试了系统的主要指标。

1 系统设计

1.1 硬件选型

HALF 的定时系统是基于 Micro-Research

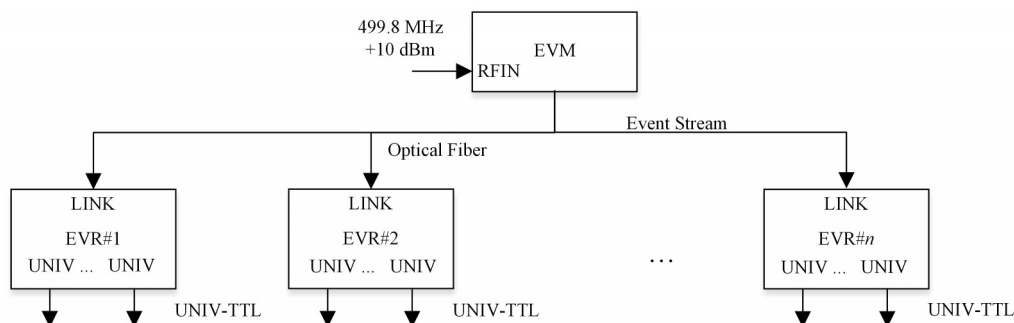


图3 定时系统硬件结构图
Fig.3 Hardware structure diagram of timing system

1.2 系统频率选择

在设计定时系统时,要使电子枪发射的电子束能填充到储存环的任一束团,需要为注入器和储存环选择合适的工作频率。

在 HALF 预研阶段设计了两种电子枪方案,即光阴极微波电子枪和热阴极电子枪。从定时系统的角度来看,光阴极微波电子枪需要由激光驱动,其要求更高。因此,以下将针对光阴极微波电子枪展开讨论。

光阴极微波电子枪使用的是具有固定重复频率的脉冲激光器,其重复频率为 f_{Laser} 。电子直线加速器的微波频率为 f_{Modu} ,电子束要在直线加速器加速,

Finland (MRF) Oy 的 MTCA. 4 (Micro Telecommunications Computing Architecture) 总线定时板卡进行设计和开发。MTCA.4 是由 PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturers Group) 创建的开放的嵌入式计算规范,通过标准高级夹层卡 (Advanced Mezzanine Card, AMC) 实现信息处理和 I/O 功能。MTCA.4 使用后转换模块 (Rear Transition Module, RTM) 扩展 AMC 的 PCB (Printed Circuit Board) 空间,提高了定时板卡的灵活性和扩展性^[12]。MTCA.4 总线定时板卡的事件时钟最高为 166.6 MHz,传输速率为 3.33 Gbps^[11],可以满足 HALF 定时系统的设计需求。

一般来说,事件定时系统由事件生成器 (Event Generator, EVG)、扇出层 (Fan-Out) 和事件接收器 (Event Receiver, EVR) 组成。在 MTCA.4 总线的板卡中,EVG 和 Fan-Out 已集成到一个单独的产品,即事件主机 (Event Master, EVM) 中。图 3 为定时系统的硬件结构图,EVM 可以响应多个事件源的触发,生成不同的事件码。EVM 对事件码和分布式总线信号进行编码形成事件流 (Event Stream)^[13],通过光纤将事件流发送至 EVR。EVR 对事件流解码,将其转换成脉冲输出信号,以触发相关设备。

需要满足 $f_{\text{Modu}} = Kf_{\text{Laser}}$,其中 K 为正整数。

从直线加速器输出的电子束,经输运线注入到储存环。储存环高频腔的频率 f_{Rf} 为 499.8 MHz,回旋频率为 f_{Revo} , f_{Rf} 与 f_{Revo} 满足 $f_{\text{Rf}} = Hf_{\text{Revo}}$, H 为储存环谐波数。

为了注入器和储存环的相关系统协同实现束团填充,需要满足 $f_{\text{Rf}} = \frac{M}{N} f_{\text{Modu}}$, M 和 N 为互质正整数,且尽可能小。

据此,得出比例关系:

$$\frac{1}{f_{\text{Laser}}} = \frac{K}{f_{\text{Modu}}} = \frac{K(M/N)}{f_{\text{Rf}}} = \frac{KM}{N} \frac{1}{f_{\text{Rf}}} \quad (1)$$

为实现电子枪发射的电子束能填充到储存环的任意束团,需要满足:当 $\frac{KM}{N}$ 为整数时, $\frac{KM}{N}$ 与 H 互

质;当 $\frac{KM}{N}$ 为分数时,将其化为最简分数时的分子与 H 互质。依照式(1),以下将讨论并比较表3中的两种频率设计方案。

表3 注入器和储存环的两种频率设计方案
Table 3 Two frequency design schemes of injection and storage ring

参数 Parameters	方案一 Option one	方案二 Option two
电子枪激光频率 f_{Laser} E-Gun laser frequency f_{Laser}	83.3 MHz	79.333 MHz
直线加速器微波频率 f_{Modu} Linac microwave frequency f_{Modu}	2 998.8 MHz	2 856 MHz
储存环高频腔频率 f_{Rf} Storage Ring RF Frequency f_{Rf}	499.8 MHz	499.8 MHz
谐波数 H Harmonic number H	799	800

将方案一中的各参数代入式(1)得出, $K = 36$, $\frac{M}{N} = \frac{1}{6}$, $\frac{KM}{N} = 6$ 。若 H 选为800,只能填充 $\frac{1}{2}$ 的束团; H 选为801,则有 $\frac{1}{3}$ 的束团能被填充;仅当 H 为799,才能填充所有的束团。当 $H=799$ 时, H 的质因数较大,可能影响到其他系统的分频设计。

将方案二中的各参数代入式(1)得出, $K = 36$, $\frac{M}{N} = \frac{7}{40}$, $\frac{KM}{N} = \frac{63}{10}$ 。此时 H 设计为800,可以保证电子束填充所有的束团。

因此,在不影响其他系统的情况下,选择第二种方案来实现储存环任意束团的填充。在定时系统中,事件发生器的输入信号频率等于 f_{Rf} ,选择与 H 互质的分频数3,则事件时钟频率 $f_{\text{Event}} = \frac{1}{3} f_{\text{Rf}}$,定时系统调节延时的步长为 $\frac{1}{f_{\text{Event}}}$ 。结合式(1)得到 $\frac{10}{f_{\text{Laser}}} = \frac{360}{f_{\text{Modu}}} = \frac{63}{f_{\text{Rf}}} = \frac{21}{f_{\text{Event}}}$,表示将电子枪发射电子束的间隔设置为 $\frac{10}{f_{\text{Laser}}}$,可以实现对储存环以63个束团长度为间隔填充。当需要填充某个束团时,电子最多在储存环旋转63圈就能完成。

1.3 储存环任意束团填充

定时系统通过设置电子枪延时、直线加速器延时和储存环延时,实现任意束团填充。这些系统需要调节的延时为各自周期的整数倍,如电子枪的延时为 $N_{\text{Laser}} \times T_{\text{Laser}}$,直线加速器的延时为 $N_{\text{Modu}} \times T_{\text{Modu}}$,储存环的延时为 $N_{\text{Rf}} \times T_{\text{Rf}}$ 。 N_{Laser} 、 N_{Modu} 和 N_{Rf} 有最大公约数 N_{GCD} ,如图4所示, N_{GCD} 与储存环束团号 n 的对应关系为:

$$N_{\text{GCD}} = \frac{800 \times \{[(n \bmod 63) \times 10] \bmod 63\} + n}{63} \quad (2)$$

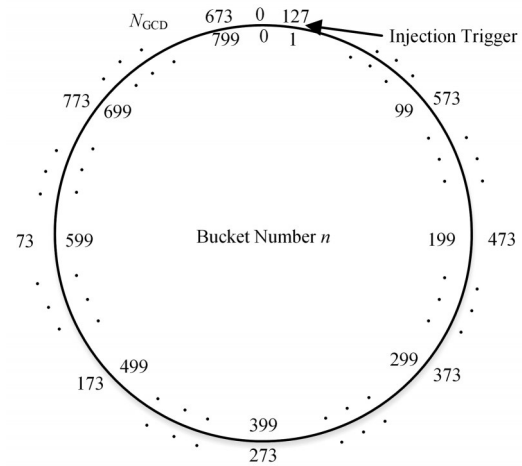


图4 储存环任意束团填充示意图
Fig.4 Schematic diagram of arbitrary bucket filling in storage ring

N_{Laser} 、 N_{Modu} 和 N_{Rf} 的表达式为:

$$N_{\text{Laser}} = 10 \times N_{\text{GCD}} \quad (3)$$

$$N_{\text{Modu}} = 360 \times N_{\text{GCD}} \quad (4)$$

$$N_{\text{Rf}} = 63 \times N_{\text{GCD}} \quad (5)$$

1.4 事件码的分配

定时系统共有256个事件码可以使用,其中有些是特殊功能事件码,比如空事件码0x00,当没有要传输的事件时,则传输0x00^[14]。

表4为目前定时系统的事件码分配情况。因为光阴极电子枪和热阴极电子枪的工作频率不同,所以为它们分配不同的事件码,操作人员可通过软件控制电子枪切换。

EVM具有主动延迟补偿(Delay Compensation, DC)功能,可以补偿信号受环境温度变化产生的延迟漂移。实现方式是通过收发信标事件码0x7E测量从EVM至EVR的事件传播延迟,然后EVR调整内部FIFO深度以匹配编程的目标延迟值。

表4 定时系统的事件码分配表
Table 4 Event code distribution of timing system

事件码 Event codes	功能 Functions
0x00	空事件信号 Null event signal
0x01	光阴极微波电子枪的触发信号 Trigger signal of photocathode RF electron gun
0x02	热阴极电子枪的触发信号 Trigger signal of thermionic cathode electron gun
0x03	调制器等注入设备的触发信号 Trigger signal of injection devices such as modulator
0x04	直线加速器束流测量设备的触发信号 Trigger signal of beam diagnostics devices at Linac
0x05	储存环束流测量设备的触发信号 Trigger signal of beam diagnostics devices in storage ring
0x7E	延迟补偿信号 Delay compensation signal
0x7F	序列结束信号 End of sequence signal

在控制软件中,将不同的事件码及其时间戳 (Timestamp) 添加到EVM的事件序列存储器 (Event Sequence RAM) 中,在事件序列的最后,事件码 0x7F 表示序列结束。

2 定时系统的软件开发

图5为EPICS架构下的定时系统软件框图,软件程序分为驱动程序、实时数据库 (IOC Database) 和操作界面 (Operator Interface, OPI) 三部分。

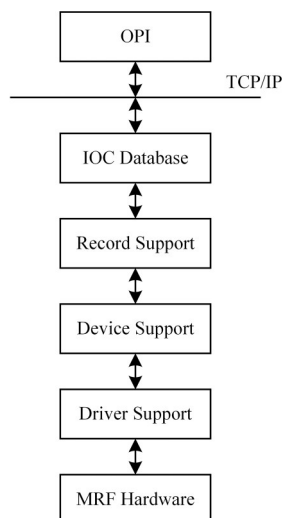


图5 定时系统的软件设计
Fig.5 Software design of timing system

驱动程序是硬件和EPICS Record之间的软件接口,包含驱动支持 (Driver Support) 和设备支持 (Device Support) 两部分^[16-17]。通过驱动程序,建立起Record和MRF定时板卡寄存器之间的联系。

定时系统的OPI程序是采用基于PyQt框架的PyDM (Python Display Manager) 开发的。PyDM作为开源Qt框架和EPICS之间的接口,发布来自EPICS的数据信息,实时显示过程变量 (Process Variable, PV) 的变化^[15-16]。图6是HALF定时系统原型系统的OPI。

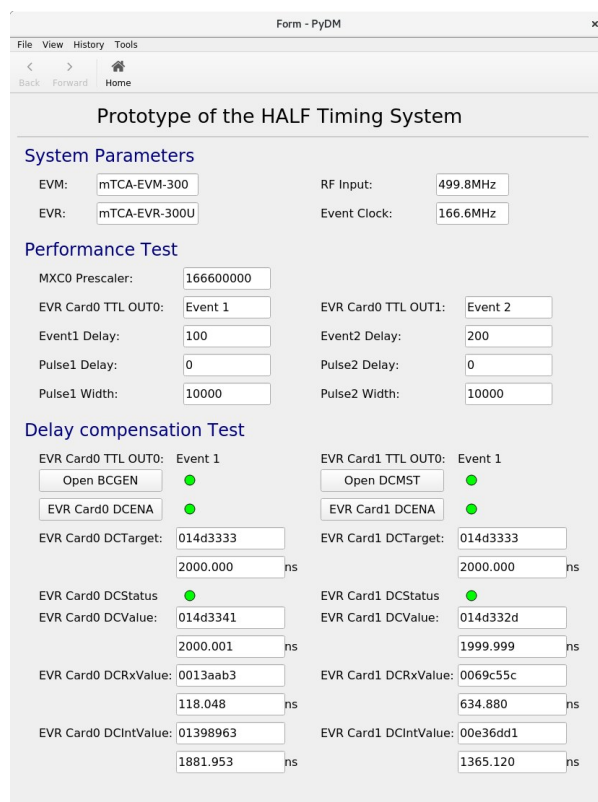


图6 定时系统的OPI界面
Fig.6 Operation interface of timing system

3 原型系统的测试与结果分析

图7(a)是定时原型系统的硬件连接图。MTCA机箱装有电源模块、NAT-MCH、CPU AMC以及三块MRF定时板卡。NAT-MCH通过背板的PCIe总线连接并管理AMC (CPU AMC和定时板卡)。定时板卡EVM的型号为mTCA-EVM-300, EVR使用的是mTCA-EVR-300U。

R&S®SMB100A信号发生器模拟高频系统的主时钟,在EVM中3分频得到频率 f_{Event} 为166.6 MHz的事件时钟信号,因此,延迟调整的最小步长 T_{Event} 为6 ns ($\frac{1}{166.6 \text{ MHz}} \approx 6 \text{ ns}$)。使用泰克

MSO64示波器测量EVR的TTL输出信号。MSO64示波器的带宽是8 GHz,最高采样率为25 GHz。

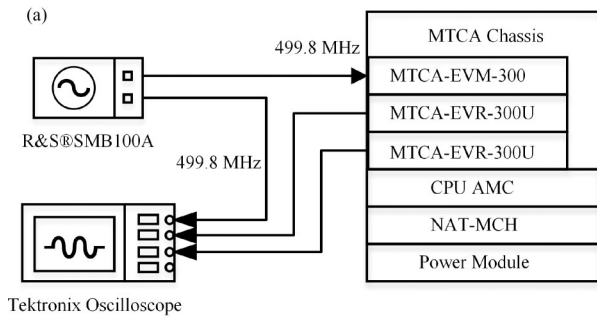


图7(b)是原型系统的实物照片。

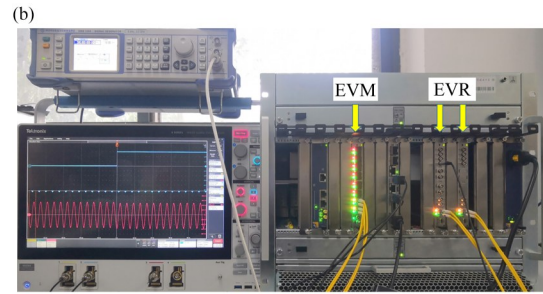


图7 定时系统原型硬件连接图(a)和定时原型系统的实物照片(b)
Fig.7 Hardware structure diagram of the prototype system (a) and photo of a prototype system (b)

3.1 RF时钟的抖动性

RF时钟的抖动性是以EVR输出信号为触发源,测量触发点与RF信号间的偏移。RF信号接入示波器通道1,EVR输出信号接入通道2,以通道2为触发源,测量RF时钟的抖动,连续测量24 h。如图8所示,RF时钟的抖动小于24 ps。

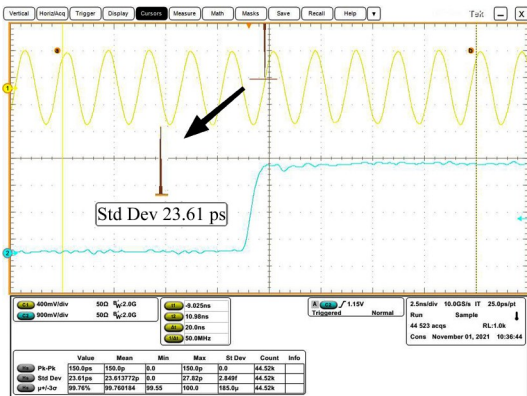


图8 RF时钟抖动测试结果
(箭头指向放大后的测试结果)
Fig.8 Jitter result of RF clock
(arrows point to enlarged test results)

3.2 延迟补偿测试

信号在传输过程中,实际位置与理想位置的偏差主要分为短时间的抖动和长时间的漂移。在定时系统中,引起信号漂移的原因主要为环境温度变化,可以用DC功能补偿信号漂移产生的误差。DC寄存器为32 bit,其中16 bit为整数部分,16 bit为小数部分^[14],所以DC调节的步长为0.09 ps ($\frac{166.6}{65\ 536} \approx 0.09\text{ ps}$)。

在测试延迟补偿功能时,EVM用两根长度相差100 m的光纤连接两个EVR进行测试。EVR响应相

同的事件码,在示波器端观察两个EVR输出的延迟平均值 t_1 ;交换EVR输出端的连接端口,再测量两个EVR输出的延迟平均值 t_2 。由 t_1 和 t_2 可以计算出信号漂移 $\frac{t_1 - t_2}{2}$ 以及系统误差 $\frac{t_1 + t_2}{2}$,系统误差主要为EVR和示波器之间连接线长度产生的时间误差。测试结果如表5所示。

表5 DC的测试结果
Table 5 Test results of DC

测试项 Test items	无DC Without DC / ns	有DC With DC / ns
t_1	$5.166\ 0 \times 10^2$	$2.347\ 0 \times 10^{-1}$
t_2	$-5.161\ 4 \times 10^2$	$2.286\ 0 \times 10^{-1}$
系统误差 System error	$2.300\ 0 \times 10^{-1}$	$2.316\ 5 \times 10^{-1}$
信号漂移 Signal drift	$5.163\ 7 \times 10^2$	$3.050\ 0 \times 10^{-3}$

图9中示波器的通道1和通道2分别为两个EVR的输出信号。当没有DC时,两通道相对延迟值为516.6 ns,消除系统误差230 ps影响后得出由光纤长度导致的信号漂移为516.37 ns。启用DC并且设置相同延迟补偿目标值,两通道相对延迟值为234.7 ps,消除系统误差231.65 ps影响后两个EVR的相对延迟值大幅减少至3.05 ps。

为测试实际环境温度变化对信号传输延迟的影响,选取长度为100.586 m的单模光纤放在温度可调的水浴中,测试25~45 °C温度变化范围内光纤的信号传输延迟值^[18-19]。以温度为25 °C时系统的延迟为标准值,测量各温度条件下延迟值变化量。如图10所示,无DC时,光纤中信号的传输延迟值随温度正向变化,在45 °C时延迟值变化量超过160 ps。有DC时,光纤中信号的传输延迟值基本保持不变,其峰峰值在3 ps左右。表明DC可以对信号漂移进行有效补偿,可确保定时系统的长期稳定运行。

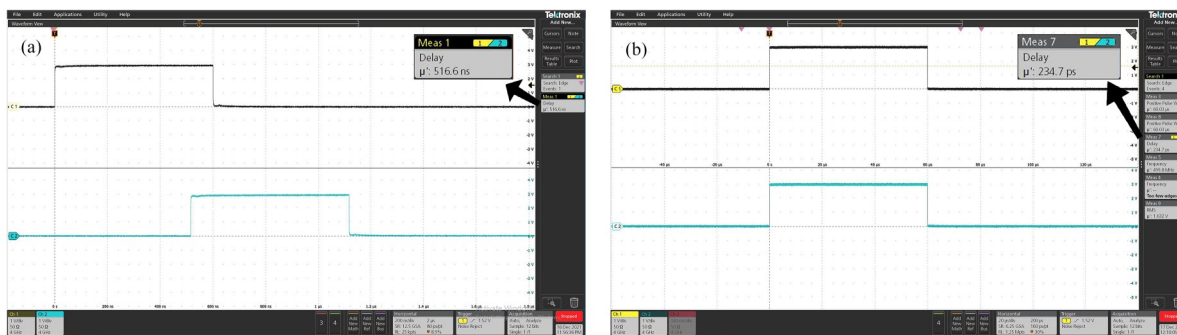


图9 无DC (a)和有DC (b)的示波器输出(箭头指向放大后的测试结果)
Fig.9 Oscilloscope output without DC (a) and with DC (b) (arrows point to enlarged test results)

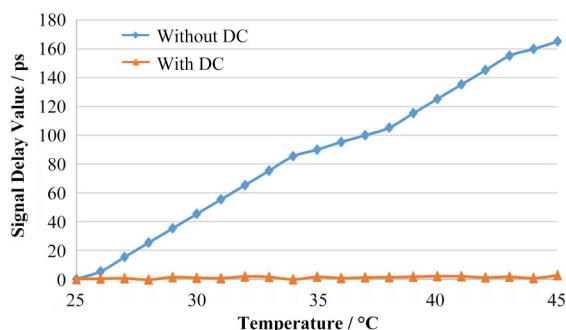


图10 光纤传输延迟随温度变化
Fig.10 Graph of optical fiber transmission delay with temperature

3.3 触发信号延迟和脉宽的测量

EVM事件序列的触发重复频率设为1 Hz,两个EVR的输出信号分别连接示波器的通道1和通道2,改变通道2的延迟时间,测量触发信号的延迟步长和范围。如图11(a)和图12(a)所示,消除EVR和示

波器间由连接线长度导致的230 ps时间误差后,EVR的延迟步长为6 ns。EVR延迟值寄存器大小为32位^[11],延迟调节范围是 $(2^{32} - 1) \times T_{Event} = 25.8$ s。由于系统的注入重复频率为1 Hz,所以如图11(b)所示实际设定的最大延时为900 ms。

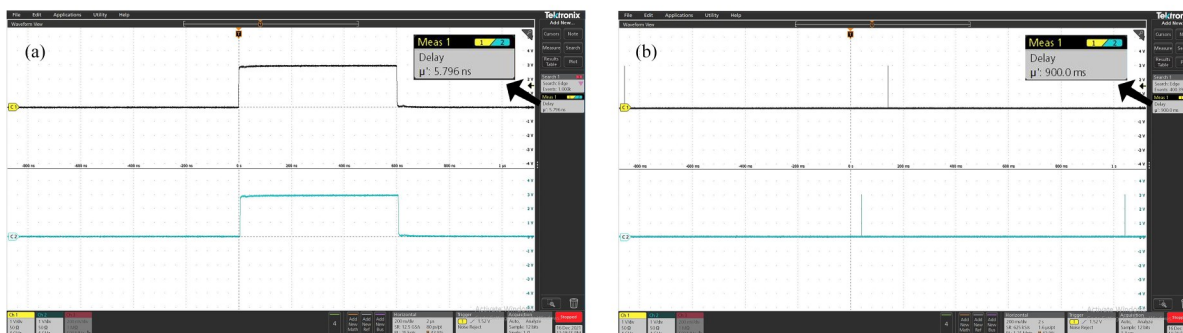


图11 调节延迟步长的测量(a)和延迟范围的测量(b) (箭头指向放大后的测试结果)
Fig.11 Measurements of delay adjustment (a) and delay range (b) (arrows point to enlarged test results)

通过改变EVR事件输出的脉冲宽度值,可以测量触发信号的脉冲宽度的调节步长和范围。由于脉宽设定值太小会影响实际测量值的准确性,所以将脉宽预设值设为 $100T_{Event}$,随后逐渐增大设定值,观察示波器的脉宽测量值。图12(b)为脉宽步长的测量结果图,直线的斜率为6.002 4 ns,则脉宽的调节步长为6 ns。mTCA-EVR-300U最多可产生16路脉

冲信号,前4路的脉冲宽度寄存器大小为32位,其他为16位^[11,19]。前4路脉宽调节范围是 $(2^{32} - 1) \times T_{Event} = 25.8$ s,其他路的脉宽调节范围是 $(2^{16} - 1) \times T_{Event} = 393.4$ μs。由于系统的注入重复频率为1 Hz,所以如图13(a)所示,前4路实际设定的最大脉宽为900 ms,如图13(b)所示,其他路的脉宽调节范围是393 μs。

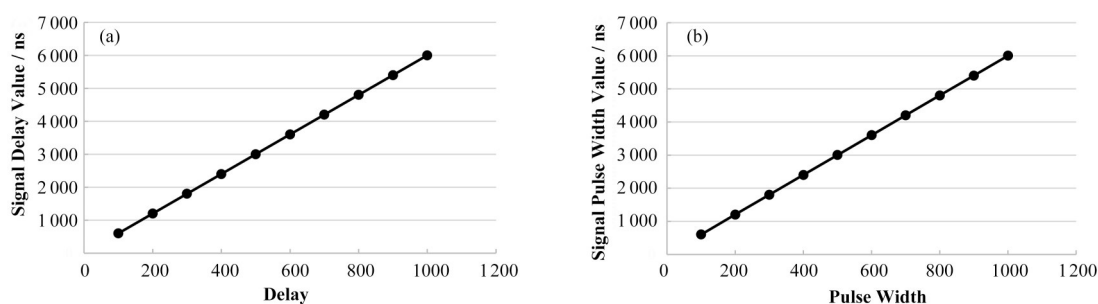


图 12 延迟步长的测量结果图(a)和脉宽的测量结果图(b)
Fig.12 Test result of delay adjustment (a) and test result of pulse width adjustment (b)

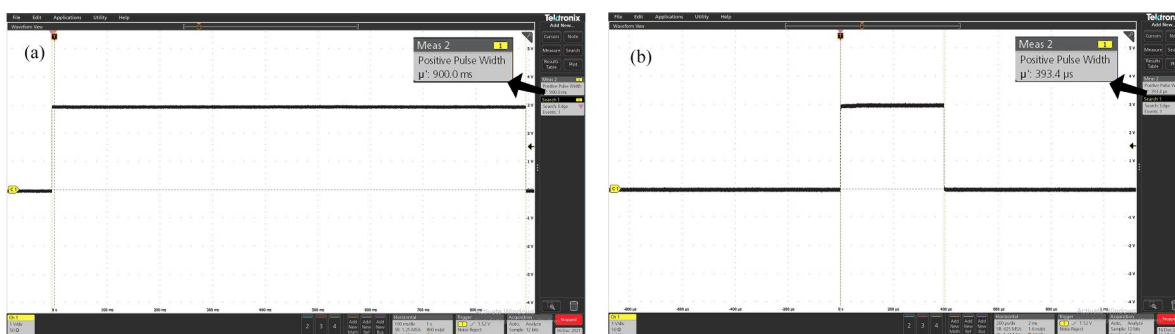


图 13 前 4 路脉宽调节范围的测量(a)和其他路脉宽范围的测量(b) (箭头两端分别是放大前后的测试结果)
Fig.13 Measurements of the first four pulse width adjustment range (a) and other pulses width range (b) (arrows point to enlarged test results)

以上测试表明, HALF 定时原型系统的主要指标达到了设计要求。

4 结语

针对 HALF 装置中物理设备的同步需求, 设计了基于 MTCA.4 的定时系统, 基于采购的商业硬件, 开发了定时系统软件。原型系统的测试表明, RF 时钟的抖动小于 24 ps, 延迟补偿功能将触发信号漂移控制在 3 ps 左右, 硬件触发脉冲信号的延迟和脉宽的调节步长均为 6 ns, 达到了 HALF 定时系统的设计要求。

作者贡献声明 翟港佳: 负责原型系统的开发和系统性能的测试, 以及文章的撰写和修订; 孙晓康: 负责资料的搜集和整理; 宣科: 负责资料的搜集和整理; 陈留国: 负责 MTCA.4 主机的调试; 李川: 负责技术方案的设计和论文的修改; 刘功发: 负责研究的提出和论文的修改。

参考文献

- Xu J, Ren Z, Yang P, *et al.* A seven-bend-achromat lattice option for the HALF storage ring[J]. *Journal of Instrumentation*, 2022, 17(1): P01001. DOI 10.1088/1748-0221/17/01/P01001.
- 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): 1–9.
- Li X, He X, Wang Z, *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.
- Jamroz J, Hardion V, Martos V, *et al.* Timing system at MAX IV - status and development[C]//*Proceedings 15th International Conference on Accelerators and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'15)*. Melbourne, Australia, 2015.
- Brito J L N, Marques S R, Tavares D O, *et al.* Status development of sirius timing system[C]//*Proceedings 15th International Conference on Accelerators and Large Experimental Physics Control Systems (ICALEPCS'15)*. 2016: 1007–1010.
- 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.
- 7 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.
 - 8 Henderson S. Status of the APS upgrade project[C]// *Proceedings of the 15th International Particle Accelerator Conference (IPAC2015)*. Richmond, VA, USA. 2015: 1791–1793.
 - 9 Yan Y B, Yu P X, Gong G H, *et al.* White rabbit based beam-synchronous timing systems for SHINE[C]// *13th International Particle Accelerator Conference (IPAC2022)*. Bangkok, Thailand, 2022.
 - 10 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.
 - 11 Pietarinen J. MRF timing system[R]. CERN Timing Workshop, European Organization for Nuclear Research, 2008.
 - 12 Pietarinen J. Event system with delay compensation[EB/OL]. 2019-03-02. <http://www.mrf.fi/fw/DCManual-170209.pdf>.
 - 13 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.
 - 14 Kraimer M R, Anderson J B, Johnson A N, *et al.* EPICS application developer's guide[J]. EPICS Base Release, 2012, **3**(11): 1–243.
 - 15 Slepicka H H, Gibbs M. PyDM-status update[C]// *Proceedings of the 17th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems*. New York, USA, 2019.
 - 16 Slepicka H H, Gibbs M. PyDM-extension points[C]// *Proceedings of the 17th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems*. New York, USA, 2019.
 - 17 Cohen L G, Fleming J W. Effect of temperature on transmission in lightguides[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1979, **58**(4): 945 – 951. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1979.tb03328.x.
 - 18 马志超, 何翠平, 王绍雷. 环境温度对单模光纤中光信号传输延时的影响[J]. *光通信技术*, 2015, **39**(5): 15–16. DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.05.005.
MA Zhichao, HE Cuiping, WANG Shaolei. Influence of ambient temperature on the optical signal transmission delay in single mode fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2015, **39**(5): 15 – 16. DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2015.05.005.
 - 19 Jukka Pietarinen. Event receiver modular register map manual[EB/OL]. 2015-06-12. <http://mrf.fi/dmdocuments/EVR-MRM-007.pdf>.