



·大科学装置运维·

## 精密时序闭环监控同步技术\*

曾静伊, 王超, 王深圳, 党钊, 张雄军, 陈文棋, 陈骥, 苏东

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 研制了一种具有同步时序闭环监控的精密同步机, 该同步机输出光同步信号, 采用单光纤反馈光模块传输同步信号、基于内插法的时间间隔测量方法, 能高精度测量反馈的光同步信号与基准信号的时间差, 实现了光同步信号的时序闭环监控, 达到的技术指标为同步时序闭环监控误差小于等于 250 ps。采用本精密时序闭环监控同步技术一方面可以保证同步信号可靠的送达触发对象, 另一方面根据测得的时间差值与设定的时序延时值进行比较, 可以获得同步信号经过光传输的固有延时量, 从而可以实现精密时序的精确配置要求。

**关键词:** 时间同步; 时序闭环监测; 时间间隔测量; 光电转换

中图分类号: TN16

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220248

## Research on a precise synchronous close-loop monitoring system technology

Zeng Jingyi, Wang Chao, Wang Shenzhen, Dang Zhao, Zhang Xiongjun, Chen Wenqi, Chen Ji, Su Dong

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In this paper, the precision delay generator with closed-loop monitoring of synchronous timing is developed. To enhance the anti-interference ability of signal transmission, the output of the delay generator is transmitted with optical signals. The optical synchronization signals is transmitted and fed back by using single-fiber feedback optical module. Based on the interpolation time interval measurement method, the time difference between the feedback optical synchronization signal and the reference signal can be measured with high precision. This system realizes the timing closed-loop monitoring of optical synchronization signals, and the error is less than or equal to 250 ps. On the one hand, the precision delay generator can ensure the reliable delivery of the synchronization signal to the trigger object. On the other hand, the inherent delay of the synchronization signal through the light transmission can be obtained according to the compared result between measured time difference and the set timing delay, so as to meet the precise configuration requirements of the precision timing.

**Key words:** time synchronization, close-loop monitoring, time-interval measurement, photoelectric conversion

同步机是产生具有一定时序关系的触发信号的设备, 用于解决激光装置、医疗设备或大型科学装置内各模块有序工作的问题。现有的同步机技术主要是通过数字电路计数实现具有一定延时和脉宽的脉冲信号, 为解决远距离传输干扰的问题, 常需要将脉冲信号转换成光信号进行传输<sup>[1-6]</sup>。但由于同步信号在传播到不同触发对象的过程中, 要经过电光转换和光纤传输, 受温度、器件的本征噪声、相噪等影响, 因而不同路的同步信号的相位发生变化, 从而导致同步信号间可能出现时间差, 使得到达触发对象的信号不同步, 时序出现错误, 而目前的同步机技术常采用开环方式进行同步信号传输, 仅完成同步信号的单向传输, 并没有对同步信号是否到达触发对象进行监控, 这样很可能会出现同步信号未送达的故障, 因此引入精密同步闭环监控系统保证所有的光同步触发信号能够按照一定时序、正常到达触发对象是十分必要且迫切的。

\* 收稿日期: 2022-08-20; 修订日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(12004352)

联系方式: 曾静伊, 1433198697@qq.com。

通信作者: 党钊, qingzhaodangma@caep.cn;

王深圳, szwang@cqu.edu.cn;

张雄军, zhangxiongjun@caep.cn。

精密同步闭环监控系统的核心是反馈信号与原始信号的时间间隔测量,目前的时间间隔测量方法主要有直接计数法、模拟法和数字内插法<sup>[7-8]</sup>。其中数字内插法采用粗计数和细时间测量组合,粗计数采用数百 MHz 计数器实现几 ns 的时间分辨,细时间测量依靠时间内插技术达到 ps 的时间分辨,其具有测量范围大、线性好、测量精度高等优点。王洪喆<sup>[9]</sup>等人采用插值法进行时间间隔测量,测量精度可达到 100 ps;王宾<sup>[10]</sup>等人采用 TDC 芯片结合 ARM 控制器搭建时间间隔测量系统,测量精度小于 73 ps;马业伟<sup>[10]</sup>等人提出可通过直接计数和模拟内插相结合的方法提高时间间隔测量精度。本文采用时间间隔测量、单光纤电光-光电转换等技术监测多路同步信号的延迟,研制了一种具有同步时序闭环监控的精密同步机,该同步机建立统一时间基准点,按设定延时信息输出光同步信号,采用单光纤反馈光模块传输同步信号,实现了光同步信号的时序闭环监控。

## 1 工作原理

图 1 为具有时序闭环监控的同步机工作原理图,包括多路电同步信号产生单元、光收发模块单元和时序监控单元三部分,其中多路电同步信号产生单元用于产生多路同步信号,光收发模块单元用于将多路同步信号转换成光脉冲发送到远端触发对象,并将远端的同步信号反馈给同步机,时序监控单元用于完成反馈信号的测量与监控。多路电同步信号产生单元包括基准时钟 clk0 模块、多种基准信号产生单元、时延单元。基准时钟 clk0 模块产生 155.52 MHz 的基准时钟信号 clk0,作为精密同步机的基准时钟信号;将该基准时钟信号 clk0 送入多种类基准信号产生单元,扇出时钟信号 clk0,同时通过分频产生时钟信号 clk1(31.104 MHz)、RST 信号(1 kHz)、多频率启动信号(1 kHz、10 Hz、1 Hz、单次信号等),其中 10 Hz 频率启动信号由 1 kHz 频率启动信号分频产生,1 Hz 频率启动信号由 10 Hz 频率启动信号分频产生,单次启动信号由 1 Hz 频率启动信号分频产生;RST 信号由 1 kHz 频率启动信号延时一段时间后产生,时序上晚于所有的多频率启动信号;将多种类基准信号产生单元扇出的 clk0、多频率启动信号、RST 信号送入时延单元,通过微步进延时以产生 16 路电同步信号。光收发模块单元包括单光纤双波长反馈式光发模块和光收模块,电同步信号通过光发模块转换成光信号,传输到光收模块,完成光电转换并以电信号的形式提供给同步触发对象,同时光收模块将最终转换的电信号扇出一路,再通过电光转换以另一种波长回传给光发模块,通过光发模块完成光电转换,产生电脉冲信号送入时序监控单元。时序监控单元的核心是多路时间间隔测量模块,多路电同步信号产生单元产生的 clk1、RST 信号作为时序监控的基准信号,光发模块接收反馈光脉冲产生的电脉冲信号送至时间间隔测量模块,由时间间隔测量模块测量反馈信号的时间实现闭环监控。时延单元多路电同步信号产生单元、时序监控单元的参数设置、时间间隔测量值获取与嵌入式控制单元通过 SPI 通信完成。

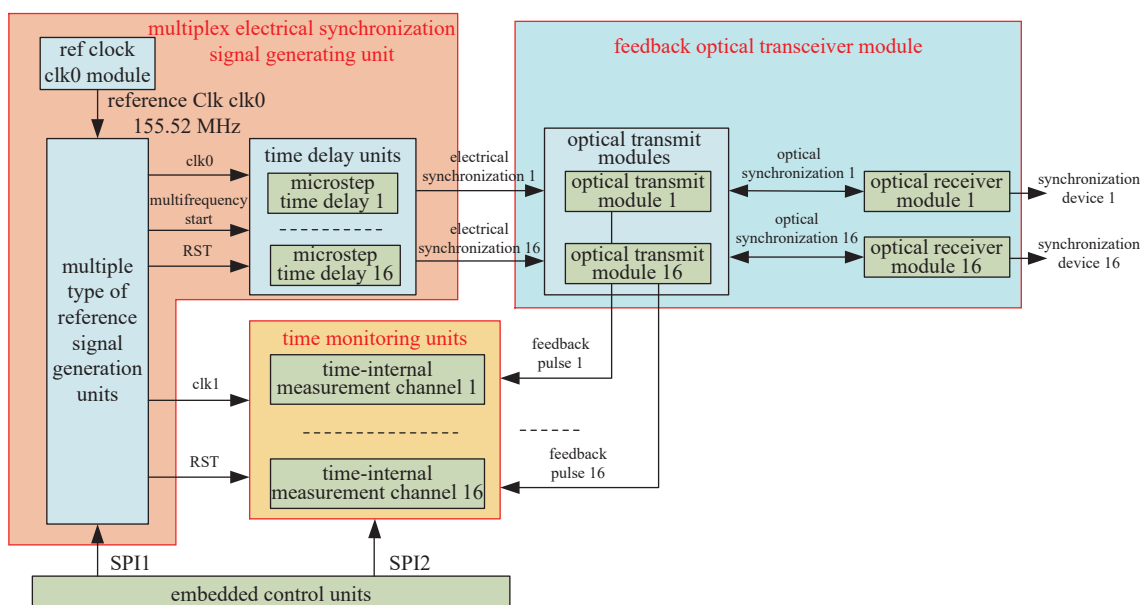


Fig. 1 Principle of the timing closed-loop monitoring synchronizer

图 1 时序闭环监控同步机工作原理

## 2 关键技术

根据图 1 所示的时序闭环监控同步机工作原理图可知,关键技术主要包括多路电同步信号产生技术、时间间隔测量技术和光同步信号闭环反馈技术。多路电同步信号产生技术用于实现多路电同步信号产生,时间间隔测量

技术通过测量反馈信号的时间间隔实现时序信号的闭环监控,光同步信号闭环反馈技术用于实现同步信号的传输及反馈。

## 2.1 多路电同步信号产生技术

多路电同步信号产生单元是同步机的核心单元,作用为产生多路可调延时和脉宽、低时间抖动的电同步信号。高精度的时序信号产生一般采用 FPGA 计数技术实现,但由于 FPGA 内核时钟一般仅为数百兆 Hz,所以计数的分辨精度只能实现 ns 级精度。本文采用高速 FPGA 内核时钟计数技术实现纳秒级粗延时、微步进延时模块实现百 ps 级精延时的技术路线。FPGA 的内核时钟采用的是 155.52 MHz,实现 6.43 ns 的粗延时。微步进延时模块采用 FPGA 中的高速并串转换模块实现,延时精度可达到百 ps 级,最终实现百 ps 级延时分辨的多路电同步信号的产生。另外由于多路电同步信号均通过高速并串转换模块实现,所以多路同步信号间具有低抖动特性,抖动范围应小于百 ps。多路电同步信号产生单元的工作原理如图 2 所示。

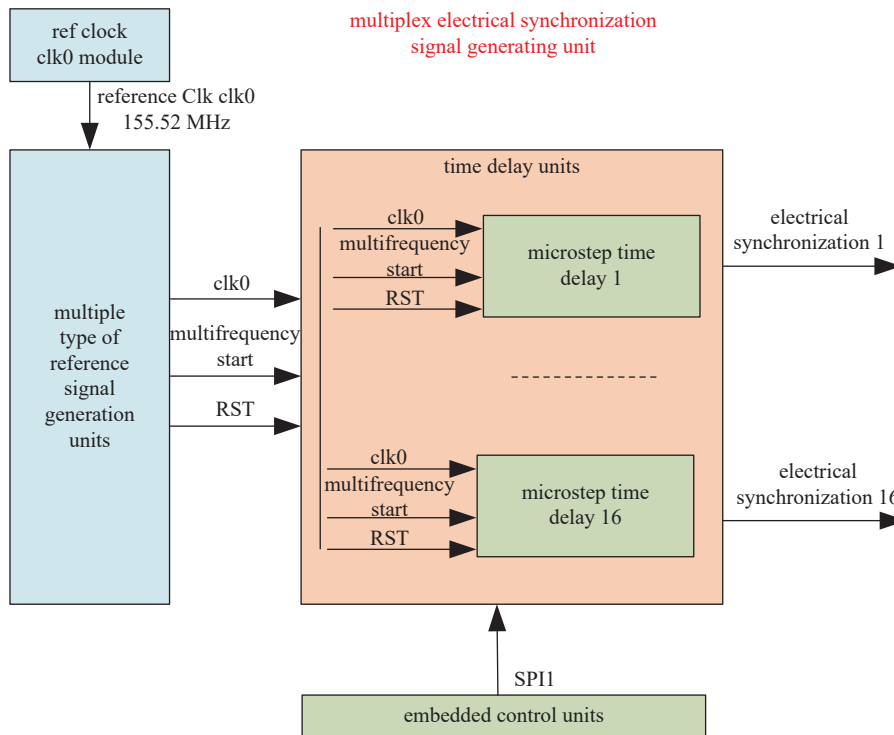


Fig. 2 Principle of multi-channel electrical synchronization signal generation

图 2 多路电同步信号产生工作原理

基准时钟 clk0 模块产生 155.52 MHz 的基准时钟信号给多种类基准信号产生单元,多种类基准信号产生单元扇出的一组基准信号(共计 6 路,包括 clk0、多频率启动信号(4 路信号,1 kHz、10 Hz、1 Hz、单次信号)、RST 信号),其中 RST 信号为时延单元多频率时间延迟的统一启动信号,可以保障时序信号在保持时延不变的情况下,在多频率之间进行切换,时序信号的时延关系不会变化。将该基准信号送入时延单元,在时延单元内将该基准信号扇出成 16 组基准信号,16 组基准信号经过基准时钟计数实现粗延时后,对应送入 16 个微步进时间延迟模块,每个微步进时间延迟模块根据嵌入式控制模块送来的设置参数完成多频率启动信号选择、时序延迟,最终送出 16 路精密时序信号。

多种类基准信号产生单元、时延单元采用高速 FPGA 电路来实现,电路设计如图 3 所示,采用图 1 时钟模块产生的基准时钟信号 clk0(155.52 MHz)送入时钟扇出芯片,扇出 5 路时钟,其中 3 路时钟作为 FPGA 芯片的工作时钟,在 FPGA 内部完成 16 路电同步信号的产生,输出信号幅度 300 mV。

多路电同步信号 PCB 设计如图 4 所示,为了保证信号完整性、电源完整性及信号布线阻抗匹配,PCB 设计采用 14 层板设计,其中信号层有 6 层,电源层及地层 8 层,同时采用蛇形走线以满足信号的完整性要求。

## 2.2 时间间隔测量技术研究

本设计中,为保证同步信号的高精度监控,需采用高精度的时间间隔测量单元。通过选型采用的是德国 ACAM 公司生产的通用时间-数字转换芯片 TDC-GPX2。该芯片具有 4 个测量通道,每个通道典型分辨率为 20 ps,

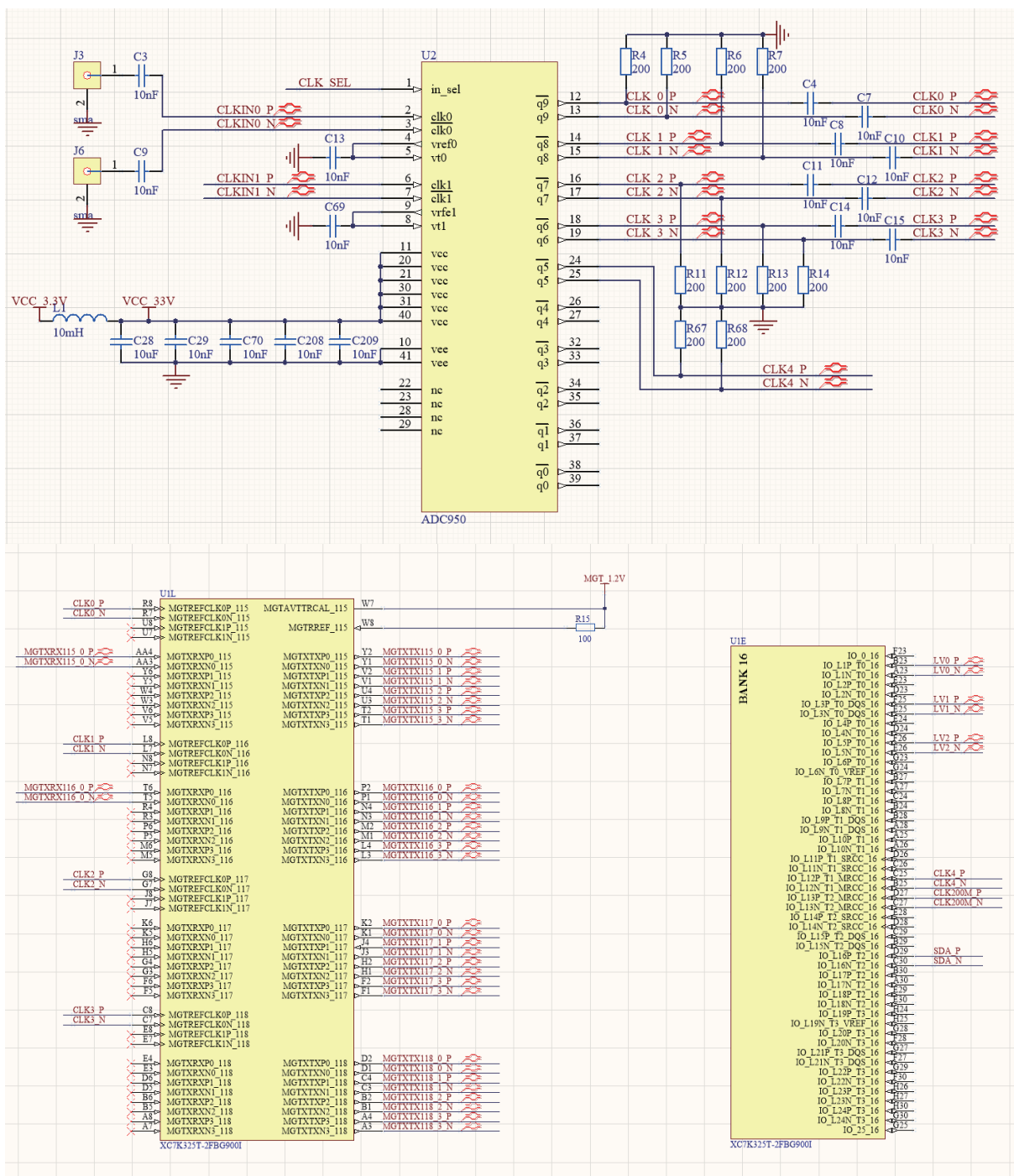


Fig. 3 Schematic diagram of multi-channel electrical synchronization signal generation

图 3 多路电同步信号产生原理图

单通道测量模式时测量范围为 0~16 s, 每通道最高 35 MHz 持续采样率。需要注意的是该芯片的典型分辨率 20 ps 指的是长时间测量时间间隔数据的半高宽范围, 并不是测量的最大偏差, 根据数据手册反映测量的最大偏差为 100 ps 左右, 但对于百 ps 级延时分辨率的同步机而言, 该芯片可保证高精度监控的需求。

TDC-GPX2 的工作时序如图 5 所示, 包括粗延时测量和精延时测量, 粗延时测量为参考时钟计数, 细延时为固定延时长度的抽头延时, 具体如下: RSTIDX 为复位信号, 该复位信号也是时间间隔测量的起始信号, 本设计采用 RST 信号, 与时延单元多频率信号时间延迟的启动基准一致, 即测量起始信号的上升沿与参考时钟的上升沿始终同步, 减少了系统误差。T<sub>REFCLK</sub> 为参考时钟, 本设计采用 clk1 时钟信号, STOP1 为通道时间间隔测量终止信号, 本设计为 16 个时间间隔测量通道对应的电脉冲 1-电脉冲 16 测量终止信号, Reference index 为参考时钟计数。单通道测量模式时, STOP1 的测量结果为 X 和 T<sub>stop</sub>, 其中 X 代表 STOP1 事件发生时参考时钟的计数, T<sub>stop</sub> 代表事件相对

于  $X$  时刻的参考时钟的时间, 由细分时钟进行计数, 具体原理如图 5(b) 所示,  $T_{\text{stop}} = m\tau$ , 其中:  $m$  为测量到终止信号时经过的延迟抽头的数量, 取决于内部寄存器 Q1、Q2 等测量结果,  $\tau$  为延迟抽头的延迟时间。因为 RSTIDX 与同步信号的基准时刻一致, 所以同步信号的延时量为

$$t = XT_{\text{REFCLK}} + T_{\text{stop}} \quad (1)$$

$t$  的延时量单位为 ps。

TDC-GPX2 的工作流程如图 6 所示: (1) 写配置寄存器, 配置 GPX2 芯片的工作模式等; (2) 读配置寄存器, 并与写入的值进行比较, 判断是否一致, 如果不一致说明寄存器未配置成功, 需要重新写入; 如果一致说明配置成功, 可以开始测量; (3) 启动测量, 等待中断, GPX2 芯片在事件到来后, 进行测量, 测量完成后将测量结果  $X$  和  $T_{\text{stop}}$  保存至芯片内部 FIFO, 并生成中断信号; 第四步是接收到中断信号后, 通过 SPI 口将测量结果读出, 并按照公式(1)进行计算, 得到输出信号的延时量, 同时继续判断中断信号, 测量下一次输出信号的延时量<sup>[11-16]</sup>。

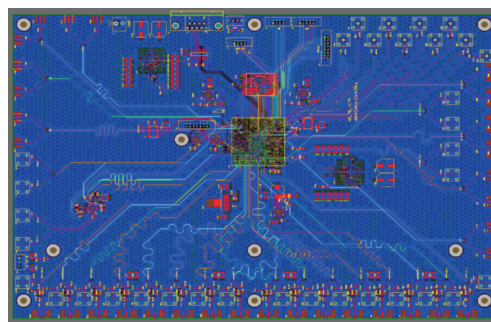


Fig. 4 PCB of multi-channel electrical synchronization signal generation

图 4 多路电同步信号产生 PCB

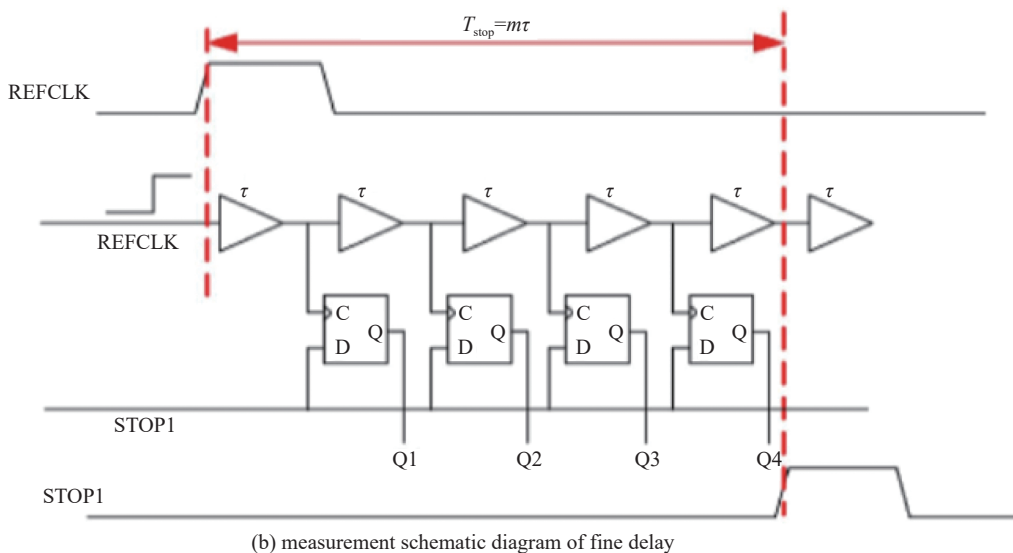
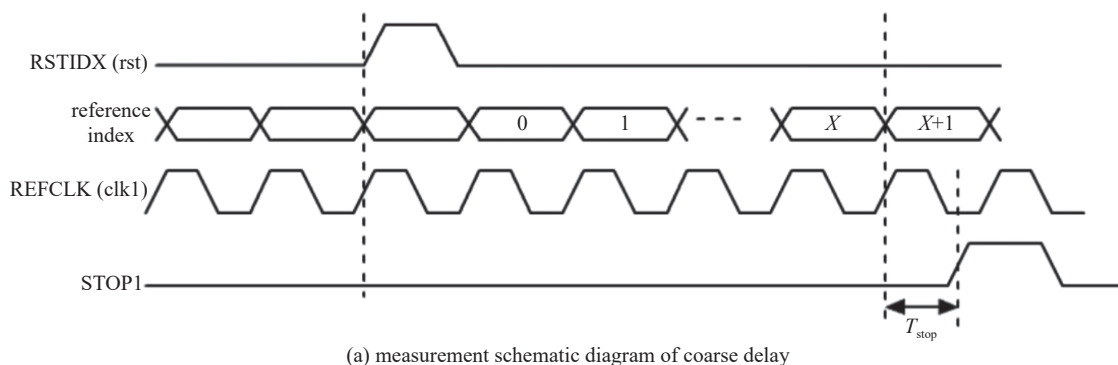


Fig. 5 Timing diagram of TDC-GPX2

图 5 TDC-GPX2 的工作时序图

通过该时间间隔测量芯片可实现 16 通道同步信号的时序监控, 具体原理图如图 7 所示, 多路电同步信号产生单元中的多种类基准信号产生模块提供一组基准信号(共计 2 路, 包括 clk1、RST 信号)送入时延单元, 通过时延单元测量 16 路电脉冲相对于同一基准起始信号 RST 的时间间隔, 进而实现经过光模块反馈后的同步信号的时序监控。

多种类基准信号产生单元扇出的一组基准信号(共计 2 路, 包括 clk1、RST 信号), 在时延监控单元内将该基准

信号扇出成四组基准信号, 每组基准信号包括 2 路信号 (clk1、RST 信号), 对应送入四个时间间隔测量模块, 每个时间间隔测量模块完成四通道时间间隔的测量, 所有时间间隔测量通道采用统一的时钟信号 clk1、时间间隔测量起始信号 RST, 每个时间间隔测量通道的终止信号为通道输入的电脉冲信号, 共计完成 16 路电脉冲的时间间隔测量。图 8 为研制的 16 通道时序监控单元, 采用 4 块 TDC-GPX2 芯片完成 16 通道时间间隔测量(每块芯片完成 4 个通道时间间隔测量), 采用 2 块扇出芯片分别扇出时钟信号 clk1、时间间隔测量起始信号 RST, 嵌入式控制单元对 4 块时间间隔测量芯片 TDC-GPX2 的操作控制通过 FPGA 芯片来完成, 最终实现对 4 块时间间隔测量芯片 TDC-GPX2 的 SPI 通信及操作控制。

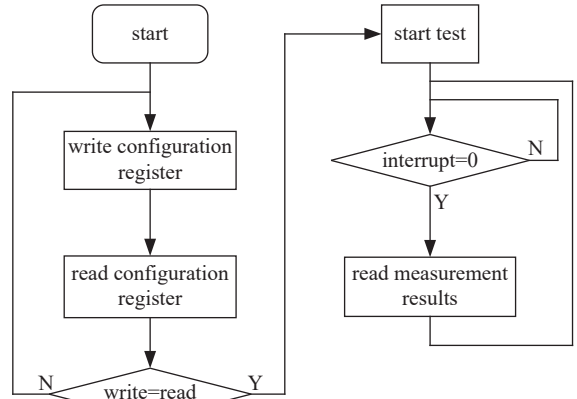


Fig. 6 Flow chart of TDC-GPX2  
图 6 TDC-GPX2 的工作流程图

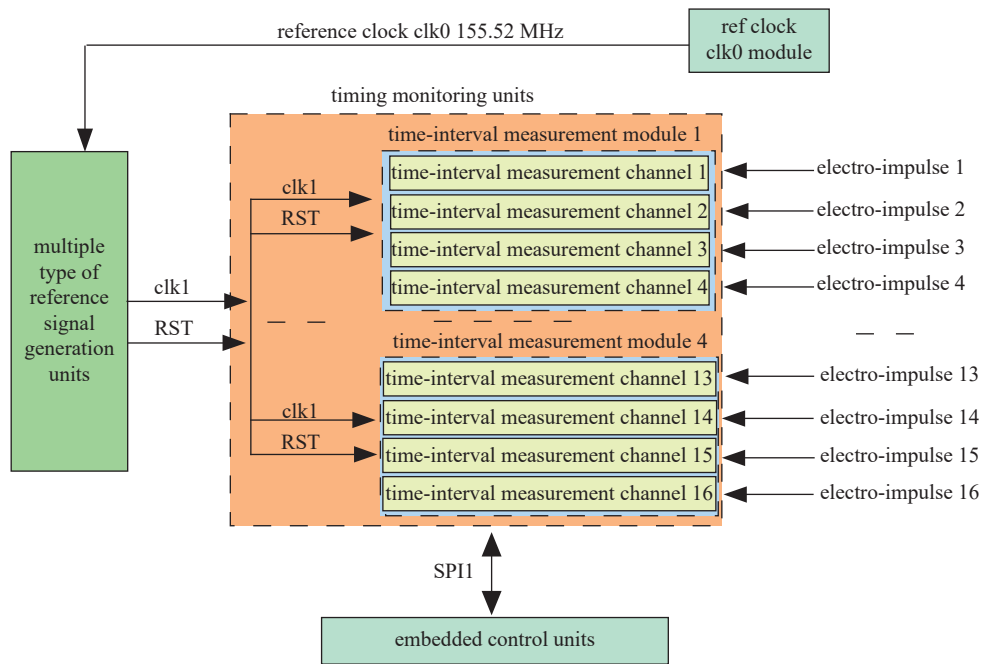


Fig. 7 Principle of channel time interval measurement  
图 7 16 通道时间间隔测量工作原理

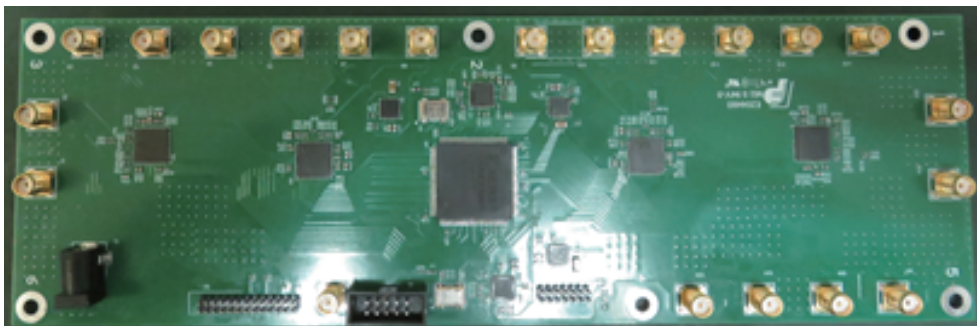


Fig. 8 16 channel timing monitoring unit  
图 8 16 通道时序监控单元

### 2.3 光同步信号闭环反馈技术

在大型激光装置和医疗设备等中, 由于同步触发对象分布较广, 所以为了抗干扰和保证可靠性, 常采用光传输和电光光电转换技术, 所以就需要光模块完成电光光电转换的功能。一般同步信号传输过程为: 首先多路电同步信号产生单元产生多路电同步信号, 然后经过光发模块完成电光转换成光同步信号, 之后通过光纤传输到触发对

象,在触发对象处经过光收模块完成光电转换恢复出电同步信号,其中使用的光发模块和光收模块为单收单发光模块,其核心为单个激光二极管 LD 或光电二极管 PD。但为了实现同步信号的时序监控,本文采用了一种单光纤反馈式收发一体光模块传输同步信号,该光模块传输同步信号的原理图如图 9 所示。FPGA 产生同步电信号,时延单元产生的电同步信号在光发模块中进行电光转换得到波长为 $\lambda_1$ 的光脉冲信号,并通过单模光纤传输到光收模块,光收模块首先进行光电转换恢复出电同步信号,送给触发对象,同时将该电同步信号再次进行电光转换得到波长为 $\lambda_2$ 的光脉冲信号,沿光纤返回光发模块,光发模块进行光电转换得到反馈信号<sup>[17]</sup>,该反馈信号送给时序监控单元相应的时间间隔测量通道,时间间隔测量单元测量出反馈信号相对于 RST 信号之间的时间延迟量,该时间延迟量包括两部分:一部分是电同步信号相对于基准时刻 RST 的延迟量,另一部分为电同步信号光传输及反馈光传输引入的时间延迟量之和。

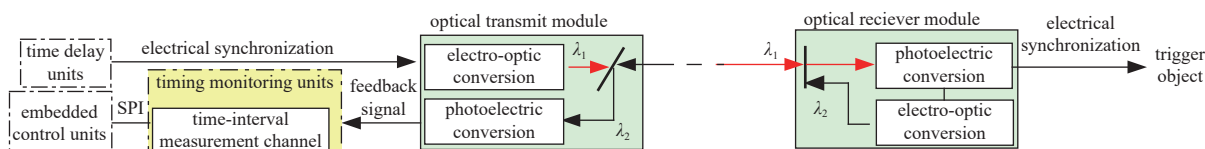


Fig. 9 Single fiber feedback optical transmission of synchronous signal

图 9 同步信号的单光纤反馈光传输

同步脉冲光信号的反馈传输核心元件为光收发模块,目前市场上光模块包括单收单发光模块、收发一体光模块等,单收单发光模块是指仅具备电光或光电转换中的一种功能,收发一体光模块是指同时具备电光和光电转换的两种功能。本设计中的单光纤反馈式收发一体光模块有别于常用的两种光模块,首先光收发模块为收发一体的光模块,都应具备光电、电光转换的功能。采用常用的 1550 nm 和 1310 nm 作为光传输的两个波长,设计为光发模块具备发送 1310 nm 的光脉冲、接收 1550 nm 的光脉冲,光收模块具备接收 1310 nm 的光脉冲、发送 1550 nm 的光脉冲。因此选择具备 1550 nm 和 1310 nm 的 BOSA/光模块。其次光模块功能上存在差异,普通收发一体光模块的光发模块和光收模块完全相同,均包括一路电光转换和一路光电转换。反馈式光发模块与普通收发一体光模块的光发模块完全相同,而反馈式光收模块功能为接收光输入信号后完成光电转换输出电信号,同时在光收模块内将电信号作为输入完成电光转换输出光信号,对外接口仅有接收电信号一种,没有发送电信号。最后因为同步电信号为脉冲信号,频率为最高为 1 kHz,最低为单脉冲信号,因此在设计光探头的驱动电路时需要考虑单脉冲也可以工作,为了保证光收模块的抗干扰能力,将输出脉冲信号先经过单稳态电路再进行电光转换。具体电路如图 10 所示。

图 11 为研制的基于单光纤的光发模块、光收模块,光发模块的功能是发射光脉冲信号和接收反馈光脉冲信

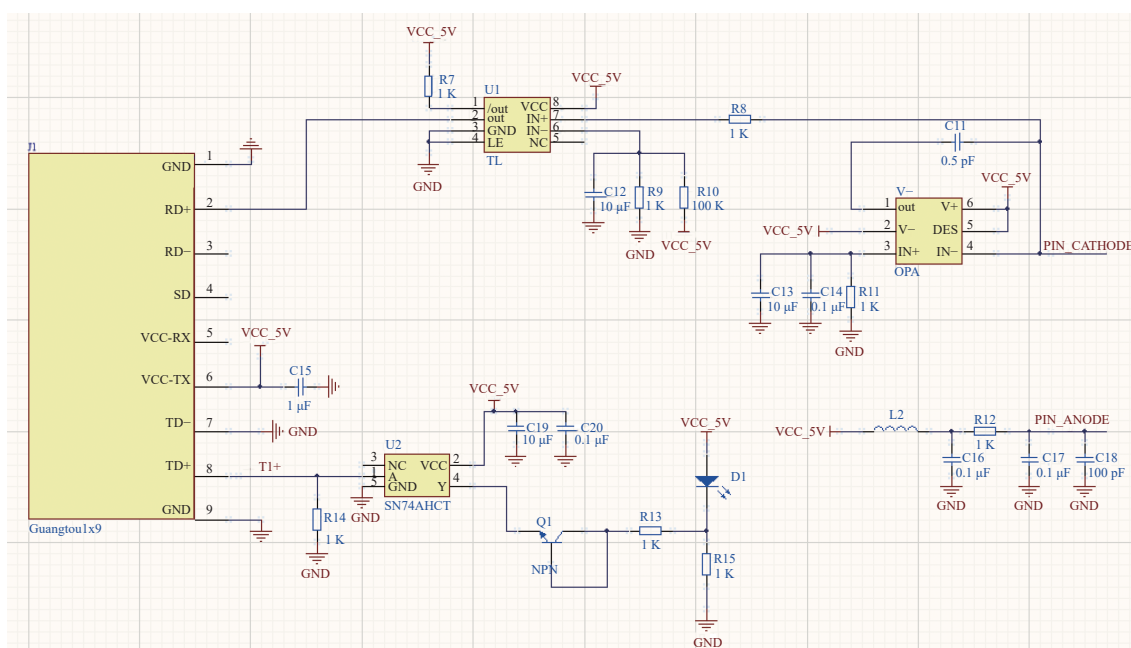


Fig. 10 Schematic diagram of single-fiber feedback optical module

图 10 单光纤反馈式光模块原理图

号, 光收模块的功能是接收光脉冲信号和发射反馈光脉冲信号。

### 3 实验验证

图 12 为光同步信号的时序监控验证, 该验证方案基于图 1 完成实验验证, 首先将多种类基准信号产生单元输出的一路 RST 信号、光发模块 1 输出的反馈脉冲 1, 送入示波器, 这样示波器可测量输入 RST 信号、反馈脉冲 1 的时间延迟量, 用来作为判断基准; 然后再将 RST 信号、反馈脉冲 1 (作为 STOP) 信号接入时序监控单元的时间间隔测量通道 1, 完成时间延迟测量; 时序监控单元测量结果与示波器的测量结果进行比较, 以示波器的测试值为基准, 判断本时序监控单元的测量精度。

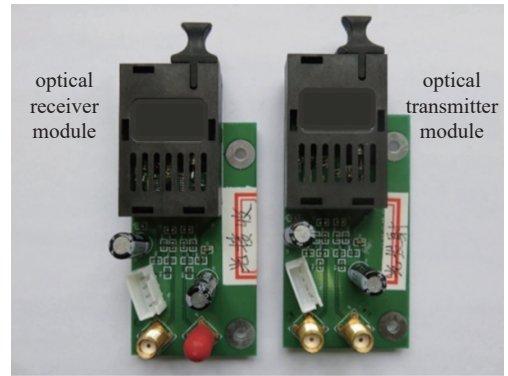


Fig. 11 Optical transmitter module and optical receiver module based on single fiber

图 11 基于单光纤的光发模块、光收模块

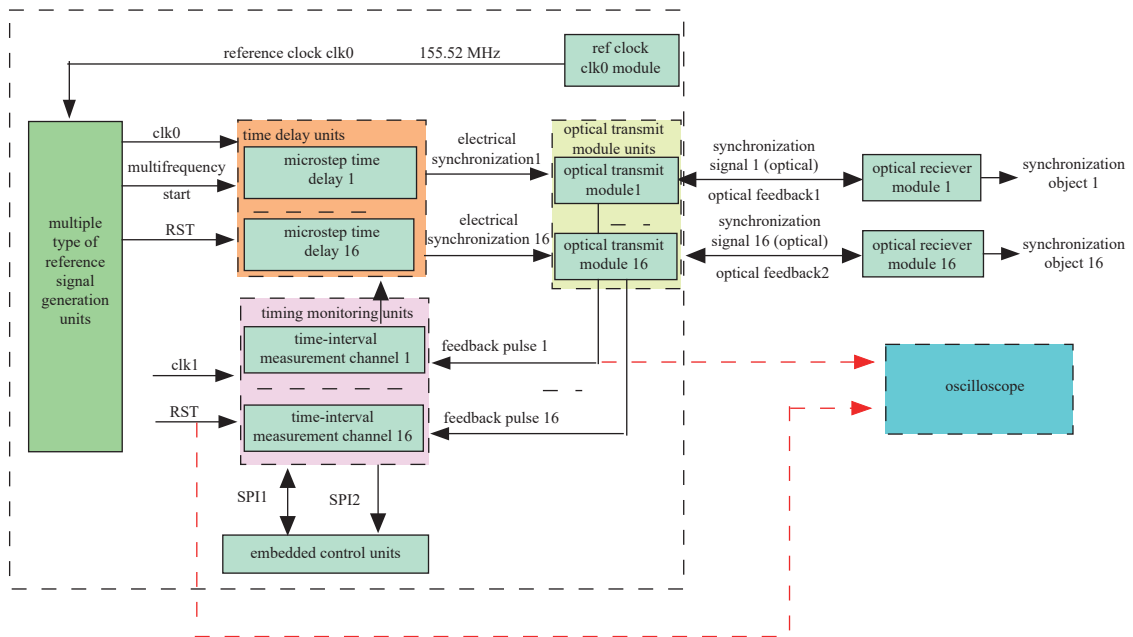


Fig. 12 Experiment platform for timing monitoring of the optical synchronization signal

图 12 光同步信号时序监控实验平台

时间延迟设置值为  $1 \mu\text{s}/1 \text{ Hz}$  情况下, 图 13 为示波器多次测试反馈脉冲 1 相对于 RST 的时间间隔误差测量, 示波器测试值在  $1029611 \sim 1029690 \text{ ps}$  内, 时间间隔测量误差的 PV 值为  $79 \text{ ps}$ 。图 14 为时序监控单元多次测试反馈脉冲 1 相对于 RST 的时间间隔误差测量, 时序监控单元测试值在  $1029400 \sim 1029650 \text{ ps}$  内, 时间间隔测量误差的

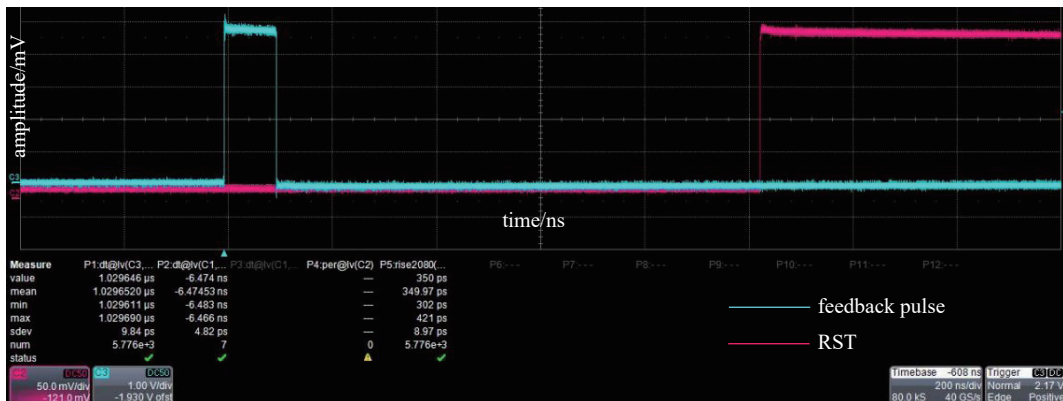


Fig. 13 The oscilloscope measures the time-interval error of the feedback pulse1 relative to RST

图 13 示波器测试反馈脉冲 1 相对于 RST 的时间间隔误差测量



PV 值为 250 ps。上述分析表明,时序监控单元测试值与示波器测试值相当,时序监控单元测试误差最大 250 ps,时序监控值与时间延迟设置值之差值为光传输的固有延时 29.65 ns。

测试了单台同步机 16 路输出的时序监控测试结果,如表 1 所示,16 路反馈电脉冲相对于起点信号 RST 在示波器上测试结果为时间间隔测量最大偏差为 92 ps,时序监控单元测试结果为最大偏差为 250 ps。

由表 1 可知:(1)示波器测试最大偏差为 92 ps,说明反馈信号相对于起点信号存在抖动,一方面电同步信号本身存在抖动,另一方面经过光收发模块的传输也会引入附加抖动;(2)时序监控单元测试结果最大偏差为 250 ps。该偏差主要来源于三个方面:第一反馈信号本身存在抖动,这一点通过示波器测量已经证实,约为 92 ps,反馈信号的抖动包括同步电信号的自身抖动和传输中光模块引入的抖动;第二时间间

隔测量芯片测量精度有限,在本文选用的时间间隔测量芯片 TDC-GPX2 测量时间间隔的最大偏差约为 100 ps;第三为时间间隔芯片提供的参考时钟精度有限,参考时钟用于粗计数,参考时钟频率稳定度较差,则在粗计数中会引入偏差,且时间间隔越长,引入偏差越大,本文采用的普通晶振提供参考时钟,普通晶振的频率稳定度为  $(10\sim 100)\times 10^6$ ,则在  $1\ \mu\text{s}$  的时间间隔下会引入几十 ps 的偏差。若要考虑提高时序监控的精度,可根据来源从以下 3 个方面进行考虑:(1)首先是降低光模块引入的抖动,可从光模块的光功率入手加快信号边沿,从而降低抖动;(2)采用测量精度更高的芯片或换用高精度测量模式;(3)最后是提高参考时钟的频率稳定度,若将频率稳定度提升至  $0.1\times 10^6$ ,则可提升几十 ps 的测量精度。

表 1 16 路同步信号时序监控测试结果

Table 1 Results of delay resolution

delay between the feedback pulse and RST in the oscilloscope/ps	peak deviation/ps	delay between the feedback pulse and RST in the timing monitoring/ps	peak deviation/ps
1 029 611~1 029 690	79	1 029 400~1 029 650	250
1 029 695~1 029 780	85	1 029 510~1 029 740	230
1 029 641~1 029 720	79	1 029 460~1 029 690	230
1 029 637~1 029 725	88	1 029 450~1 029 690	240
1 029 635~1 029 709	74	1 029 450~1 029 680	230
1 029 674~1 029 760	86	1 029 580~1 029 730	250
1 029 626~1 029 695	69	1 029 430~1 029 660	230
1 029 613~1 029 698	85	1 029 430~1 029 670	240
1 029 616~1 029 693	77	1 029 430~1 029 660	230
1 029 601~1 029 693	92	1 029 400~1 029 650	250
1 029 617~1 029 698	81	1 029 410~1 029 660	250
1 029 649~1 029 728	79	1 029 450~1 029 690	240
1 029 638~1 029 629	91	1 029 340~1 029 590	250
1 029 662~1 029 750	88	1 029 470~1 029 710	240
1 029 658~1 029 731	74	1 029 460~1 029 690	230
1 029 651~1 029 737	86	1 029 460~1 029 700	240

## 4 结 论

本文研制了一种具有同步时序信号闭环监控的精密同步机,对同步机的各组成模块工作原理进行阐述,给出了详细的设计,在搭建的实验平台上进行了测试。该同步机可实现 16 个通道同步信号的输出以及闭环监测,将多

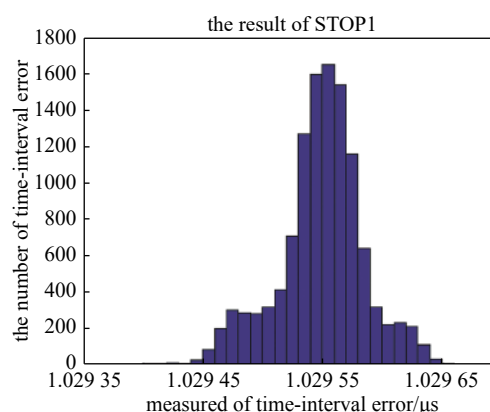


Fig. 14 The timing monitoring unit measures the time-interval error of the feedback pulse1 relative to RST

图 14 时序监控单元测试反馈脉冲 1 相对于 RST 的时间间隔误差测量

种类电同步信号输出为光同步信号,采用单光纤反馈光模块传输同步信号,实现了光同步信号的时序闭环监控,可以监测光同步信号是否可靠送达同步触发对象、同步信号光传输的固有延时,可满足高精度、高可靠性要求的仪器设备或者系统的精密同步要求。本仪器采用基于内插法的时间间隔测量方法,测量光发射模块接收到的反馈光脉冲与仪器基准信号的时间延迟量,测得光同步时序信号的闭环监控误差小于等于 250 ps(量程为 1  $\mu$ s),与示波器测量值相当;而且根据测量值与设定的时序延时设置进行比较,可以获得同步信号经过光传输的固有延时量,从而可以实现精密时序的定时配置要求。另一方面本研究中时间间隔测量精度优于 250 ps,目前研究中可实现 100 ps 以内的测量精度,相较于其他时间间隔测量系统而言,精密时序闭环监控系统还可以通过更换更高精度的测量芯片以及提高参考时钟的稳定度等方法得到进一步提升,从而达到及超越目前国内外的最高水平。该同步机具有良好的延展性,在广空间范围的大型激光装置中可以将多台同步机互连,实现甚多路高精度的同步信号的产生。

#### 参考文献:

- [1] 党钊,唐菱,王超,等. 单次快前沿电脉冲信号的远距离低抖动传输[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1196-1200. (Dang Zhao, Tang Ling, Wang Chao, et al. Low jitter long distance transmission of single fast timing electric pulse[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1196-1200)
- [2] 党钊,唐菱,张晓璐,等. 大型激光装置精密同步系统总体技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 081009. (Dang Zhao, Tang Ling, Zhang Xiaolu, et al. General technology research on high precision synchronizing system for large-scale laser facilities[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 081009)
- [3] Lerche R A, Coutts G W, Lagin L J, et al. The NIF integrated timing system-design and performance[C]//8th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics and Control Systems. 2001.
- [4] 高平,代刚,郭玉山,等. 多路纳秒延时同步脉冲的产生与传输[J]. 信息与电子工程, 2007, 5(2): 123-125. (Gao Ping, Dai Gang, Guo Yushan, et al. Generation and transmission of multiplex nanosecond delay pulse[J]. Information and Electronic Engineering, 2007, 5(2): 123-125)
- [5] 王深圳,王超,党钊,等. 一种广分布低抖动同步时钟分发系统和方法: 110212916A[P]. 2019-09-06. (Wang Shenzhen, Wang Chao, Dang Zhao, et al. A widely distributed low jitter synchronous clock distribution system and method: 110212916A[P]. 2019-09-06)
- [6] 王超,王深圳,党钊,等. 一种低抖动脉宽高分辨率可调方波脉冲产生系统和方法: 110620570A[P]. 2019-12-27. (Wang Chao, Wang Shenzhen, Dang Zhao, et al. A low jitter pulse width high resolution adjustable square wave pulse generation system and method: 110620570A[P]. 2019-12-27)
- [7] 徐望,陈鑫,李方能,等. 高精度时间间隔测量方法分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(4): 71-78. (Xu Wang, Chen Xin, Li Fangneng, et al. Method analysis on high precision time-interval measurement[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(4): 71-78)
- [8] ACAM Corporation. TDC-GPX ultra-high performance 4 channel time-to-digital converter[M]. Germany ACAM Corporation, 2007.
- [9] 王洪喆,辛德胜,张剑家,等. 脉冲激光测距时间间隔测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1751-1754. (Wang Hongzhe, Xin Desheng, Zhang Jianjia, et al. Pulsed laser ranging time-interval measuring technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(8): 1751-1754)
- [10] 王宾,吕志刚,郝辉,等. 一种多通道精密时间间隔测量系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 144-150. (Wang Bin, Lv Zhigang, Gao Hui, et al. Design of a multi-channel precision time interval measurement system[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(12): 144-150)
- [11] 马业伟,赵尚弘,蒙文,等. 激光测距信号内插法研究[J]. 现代电子技术, 2009, 30(2): 171-173,176. (Ma Yewei, Zhao Shanghong, Meng Wen, et al. Discussion on the signal processing of laser range finder[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 30(2): 171-173,176)
- [12] 陈晖,郑福,翟光杰. 基于时间标记的60皮秒FPGA精密时间测量系统[J]. 电子设计工程, 2016, 24(8): 68-71. (Chen Hui, Zheng Fu, Zhai Guangjie. A 60ps FPGA precise time measurement system based on time-stamping[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(8): 68-71)
- [13] Bahn W, Nam J H, Lee S H, et al. Digital optoelectrical pulse method for Vernier-type rotary encoders[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(2): 431-440.
- [14] Keranen P, Maatta K, Kostamovaara J. Wide-range time-to-digital converter with 1-ps single-shot precision[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(9): 3162-3172.
- [15] 辜新宇,郭际,施韶华,等. 多通道精密时间间隔测量系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 69-75. (Gu Xinyu, Guo Ji, Shi Shaohua, et al. Development of precise multi-channel time-interval measurement system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(1): 69-75)
- [16] Mota M, Christiansen J, Debieux S, et al. A flexible multi-channel high-resolution time-to-digital converter ASIC[C]//2000 IEEE Nuclear Science Symposium. Conference Record. 2000: 155-159.
- [17] Ebenhag S C, Hedekvist P O, Jalchag K. Active detection of propagation delay variations in single way time transfer utilizing dual wavelengths in an optical fiber network[C]//2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum. 2011: 1-6.