地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA
ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制

李彩华 滕云田 周健超 胡星星 王喜珍 李小军 王玉石

Design on high-precision time-synchronization system for distributed seismic data acquisition

Li Caihua, Teng Yuntian, Zhou Jianchao, Hu Xingxing, Wang Xizhen, Li Xiaojun, Wang Yushi

引用本文:
李彩华, 滕云田, 周健超, 胡星星, 王喜珍, 李小军, 王玉石. 2022. 分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制. 地震学报[J], 44(6): 1111–1120. DOI: 10.11939/jass.20210124
Li C H, Teng Y T, Zhou J C, Hu X X, Wang X Z, Li X J, Wang Y S. 2022. Design onhigh-precision time-synchronization system for distributed seismic data acquisition. *Acta Seismologica Sinica*[J], 44(6): 1111–1120. DOI: 10.11939/jass.20210124

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11939/jass.20210124

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光泵磁力仪频率信号高精度测定技术实现
Realization of high-precision measurement technology for frequency signal of optically pumped magnetometer
地震学报. 2021, 43(2): 245–254 https://doi.org/10.11939/jass.20200091

离散时变重力数据的可视化、指标量定义与解释
The index definition, interpretation and visualization of discrete time-variable gravity data
地震学报. 2017, 39(5): 682–693 https://doi.org/10.11939/jass.2017.05.005

利用高精度小震资料确定新丰江水库大坝区北西向发震断层
Determination of the NW-trending faults in Xinfengjiang Reservoir dam by using high-precision small earthquake data
地震学报. 2017, 39(1): 23–33 https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.003

利用动态时间规整方法实现不同时间长度地震观测资料的形态匹配
Morphological matching of seismic observation date with different time length using dynamic time warping method
地震学报. 2019, 41(6): 769–777 https://doi.org/10.11939/jass.20190016

自然时间域中的地震序列参数分析
Order parameter analysis of seismicity in natural time domain
地震学报. 2017, 39(4): 593–603 https://doi.org/10.11939/jass.2017.04.013

利用区域地震体波走时评价华北地区三维地壳速度结构模型
Evaluation of 3D crustal velocity models in North China using regional earthquake travel time data
地震学报. 2019, 41(2): 139–154 https://doi.org/10.11939/jass.20180057

第 44 卷　第 6 期　　地　震　学　报　　Vol. 44, No. 6
2022 年 11 月　(1111-1120)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Nov., 2022

李彩华，滕云田，周健超，胡星星，王喜珍，李小军，王玉石. 2022. 分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制. 地震学报，**44**(6)：1111-1120. doi：10.11939/jass.20210124.
Li C H, Teng Y T, Zhou J C, Hu X X, Wang X Z, Li X J, Wang Y S. 2022. Design on high-precision time-synchronization system for distributed seismic data acquisition. *Acta Seismologica Sinica*, **44**(6): 1111-1120. doi: 10.11939/jass.20210124.

分布式地震数据采集器的高精度时间同步系统研制*

李彩华[1)]　滕云田[1),†]　周健超[1)]　胡星星[1)]
王喜珍[1)]　李小军[2)]　王玉石[2)]

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所
2) 中国北京 100124 北京工业大学城市建设学部

摘要　为了解决分布式地震数据采集系统的同步授时问题，本文研制了一套高精度时间同步授时系统. 该系统在通信过程中周期性地发送同步授时秒脉冲，并通过授时秒脉冲传输实现实时传输延时测量及时间校正，从而实现多通道高精度同步授时. 基于此设计原理，采用高速硬件可编程器件研制了同步授时系统，并通过测试证实该系统在 2 km 通信距离时同步授时精度优于 200 ns，表明该同步授时系统稳定、可靠并具有一定实用性.

关键词　时间同步　分布式数据采集　延时测量　时间校正
doi：10.11939/jass.20210124　　**中图分类号**：TH762.2　　**文献标识码**：A

Design on high-precision time-synchronization system for distributed seismic data acquisition

Li Caihua[1)]　Teng Yuntian[1),†]　Zhou Jianchao[1)]　Hu Xingxing[1)]
Wang Xizhen[1)]　Li Xiaojun[2)]　Wang Yushi[2)]

1) *Institute of Geophysics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100081, *China*
2) *Department of Urban Construction*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*

Abstract: In order to solve the time-synchronization problem of distributed seismic data acquisition system, we designed a new high-precision time-synchronization technical system in this paper. In this system, a synchronous timing pulse was transmitted periodically during data communication. Through transmitting time measurement and its transmission delay time correction of synchronous timing pulse, high-precision multi-channel time synchronization was achieved in this technical system. And a time-synchronization technical system designed with high-speed programed chips was used to carry out the time-synchronous test. The result proves that the

* **基金项目**　科技部重点研发计划项目(2019YFC1511000)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费(DQJB19B13)联合资助.
收稿日期　2022-02-13 收到初稿，2022-05-26 决定采用修改稿.
作者简介　李彩华，博士，副研究员，主要从事地震观测技术研究，包含数据采集技术和地震传感技术研究等，e-mail：caihli_2004@163.com；†滕云田，博士，研究员，主要从事固体地球物理学和地震观测与信息技术研究，e-mail：tyt1966@sohu.com

synchronous timing accuracy of time-synchronous system is better than 200 ns when the optical fiber is 2 km, which indicates that the time-synchronization system is stable and practical.

Key words: time-synchronization; distributed data acquisition; delay time measurement; time correction

引言

时间同步技术是多种行业的基础支撑技术，它所提供的高精度同步时间是科学实验和工程技术等方面的基本物理量．随着高精度同步授时在各个行业的需求愈加广泛，科研、生产和生活中时间的同步性和稳定性也越来越重要，例如电力网的时间精确和统一就是电力系统自动化和安全运行的要素之一，时分同步码分多址(time division-synchronous code division multiple access，缩写为 TD-SCDMA)等通讯网络系统一般需要微秒级的时间同步，准确统一的时间也是利用各类地震观测系统进行地震科学研究的前提．因此，自主研究简单实用高精度的同步授时系统并将其应用于各类科研、生产、生活中具有重要意义，特别是对于地震研究而言，在各类地震动观测台阵、强震动观测台阵及边坡滑坡震动监测系统的建设与长期运行中，获取更高质量的同步地震动监测数据，对我国地震监测预报和地球科学研究等都非常重要．

地震动监测系统对系统内仪器的时间同步都具有一定的精度要求，其中小孔径地震台阵和密集台阵等对地震仪器时间同步的精度要求更高．小孔径地震台阵是在与所观测地震波波长相当的孔径范围内有规则排列的一组地震计，采用独特的地震数据处理方法对这些地震计的输出信号进行各种组合分析．将各子台的数据时间对齐后进行抑制地面噪声、压低干扰背景、提高信噪比等方面的处理，从而提升地震监测能力，实现提取更微弱地震信号的目的．故台阵内各地震计时间同步误差将极大地影响微弱信号的提取效果．Meng 等(2014)提出了利用近断层密集台阵波束形成技术反演震源方位角的方法来实时估测震源的破裂长度，用美国的 UPSAR 强震动台阵记录对多次地震进行破裂长度的估测，取得了较好的结果．该方法需要小孔径地震台阵提供精确的走时，但我国现有的一些强震动观测台阵中各观测子台的观测仪器均为独立授时，各子台记录可能存在时钟同步误差问题，因此对密集台阵中台站之间的时间延迟及其精度的确定有一定影响(刘辰等，2018)．此外，水库大坝等地震动监测系统的地震动监测仪器安装于密闭廊道内，不具备使用传统的全球定位系统和北斗卫星导航系统(Global Positioning System/BeiDou Navigation Satellite System，缩写为 GPS/BDS)授时设备的条件，因此水库大坝、水电站等结构设施的地震动监测系统也需要一种更实用的授时系统．鉴于上述情况，本文拟提出一种基于实时光纤通信的多通道同步授时系统，以期解决各类分布式地震数据采集系统的高精度同步授时问题．

1 传统时间同步授时技术

目前各类地震观测仪器及地震动观测台阵常用的时间同步技术主要有短波(长波)授时技术、卫星授时技术、网络授时技术和 IRIG-B (Inter-Range Instrumentation Group-B)码授时技术等，其中短波(长波)授时技术是利用不同波长信号通信实现地震动观测台阵中多个观测设备时间同步的方法，该种方法授时简单但授时精度有限，短波授时精度一般为毫秒级，长

波授时精度为微秒级，一般仅用于野外特殊场地的部分观测设备．多数地震动观测台阵采用 GPS/BDS 卫星授时技术的地震观测设备，其内配置 GPS/BDS 接收模块，当 GPS/BDS 卫星天线接收到足够多的空间卫星信号后（王向军等，2016；郭长发，2018），地震观测设备就能够获取到准确而无累积误差的高精度时间，进而实现同一区域的多台地震观测设备的时间同步．

网络时间同步授时技术是基于网络传输的一种授时技术，如基于网络时间协议（network time protocol，缩写为 NTP）、简单网络时间协议（simple network time protocol，缩写为 SNTP）、网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准等标准或协议的授时技术（魏丰，孙文杰，2009；彭栋，郭伟，2018）．网络时间协议是通过 NTP 协议和时间源进行时间校准，根据服务器与客户端往返报文来确定两者之间的时钟差值和报文在网路传输中的延迟向网络内的其他客户端提供精准时间服务．这种技术是可以跨越广域网、局域网的复杂时间协议，通常可以获得毫秒级的同步精度．网络授时技术也可以用硬件辅助解决网络协议栈和以太网中交换器、路由器产生的时延稳定问题（马红皎等，2014；翟学明等，2016），用支持网络协议的硬件芯片在以太网口的物理层设计实时时钟、打时间戳，从而将时延降低到极小的数量级（小于 1 μs）．

虽有如上多种同步授时方法，但部分地震观测设备所处地理位置特殊，无法架设 GPS/BDS 接收天线，且其它授时方法的授时精度无法达到高精度同步地震观测的需求，因此本文将提出以基于光纤通信的多通道同步授时技术实现多通道分布式地震数据采集系统的高精度同步授时，并将其应用于小孔径地震台阵监测系统的授时．

2 高精度同步授时技术原理

2.1 光信号传输延时测量原理

光信号在光纤中传播的速度约为 2×10^8 m/s，长度为 l（单位为 m），光纤中单程光信号传播的时间为 $t=l/(2\times10^8)$ s．若光信号从光纤初始端发送并在光纤中匀速传播，该光信号到达光纤接收端即刻沿光纤原路返回至光纤初始端，那么在此传播过程中，光信号所需的传输时间为 $t=2l/(2\times10^8)$ s．当所使用的光纤长度固定时，光信号在该段光纤中的传播时间即可确定，因此可以设计高精度时间测量电路来测量该传输时间．若一种设备的光信号发送端的发送时间可控、光信号接收端识别与返回电路的时间可控，则可以精确地测量光信号在不同长度光纤中的传输时间，并可以利用延时测量的时间值对授时操作进行时间校正，所以基于此原理设计一种多通道时间同步授时系统来实现分布式地震数据采集设备的高精度远距离同步授时是可行的．

2.2 高精度同步授时校正原理

通过研究授时秒脉冲发送和接收时间测量方法、纳秒级定时器设计方法、授时秒脉冲及对应时间数据的编译与解析方法，设计一套高精度时间同步授时系统，具体步骤如下：① 通过高速可编程电路设计时间测量模块，实时测量授时秒脉冲的发送时间与返回时间，计算出该授时通道的授时秒脉冲全路径时间的延迟值（图 1a）；② 以内部高精度高频时钟信号为源，用硬件逻辑编程设计纳秒级精度的定时器，并在下一个授时秒脉冲到达前提前 t_a s 完成延迟校正的秒脉冲发送（图 1b），从而达到补偿该授时通道的系统延时及光纤传输线路延时的目的；③ 图 1a 中 t_d 为某授时通道的授时秒脉冲传输全路径的时间延迟值，图 1b 中第一组秒脉冲信号为同步授时端发送出去的、经过时间校正的授时秒脉冲信号，第二组秒脉冲信号

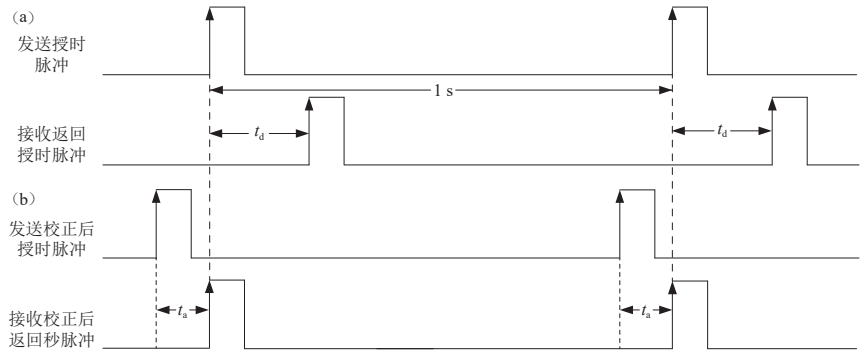

图 1 同步授时秒脉冲(a)及延时校正后的授时秒脉冲(b)

Fig. 1 Synchronous timing second pulse (a) and timing second pulse after delay correction (b)

为时间接收模块端接收到的授时秒脉冲信号，其中 $t_a=0.5t_d$. 此秒脉冲信号理论上与该授时通道的初始发送秒脉冲时间同步.

3 高精度同步授时系统设计

3.1 高精度同步授时系统结构

本文设计的高精度同步授时系统基于 GPS 卫星授时技术，GPS 接收模块在卫星条件及气候良好条件下，与 GPS 时间同步精度为纳秒级别，这种精度的时钟作为本系统的时间基准能够满足需求. 高精度授时系统的结构如图 2 所示，包含同步授时中心、同步授时模块、光纤和时间接收模块. 该系统进行同步授时脉冲传输的延迟时间测量及延迟时间校正、同步授时脉冲发送及时间信息编译、光电转换及光信号传输数据、时间接收模块识别授时脉冲及时间信息，自动完成多路时间接收模块端的同步授时.

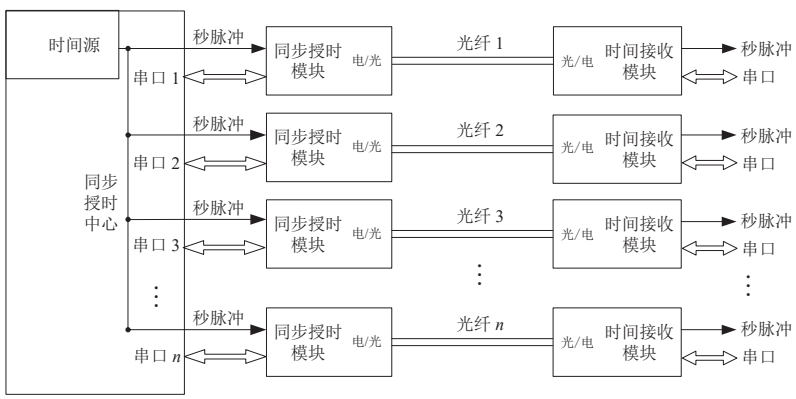

图 2 时间同步授时系统结构图

Fig. 2 Structure chart of synchronous timing system

在同步授时系统中，同步授时中心通过串口连接多个同步授时模块，每路同步授时模块由光纤连接对应的时间接收模块. 多个同步授时模块从同步授时中心模块获得高度同步的授时秒脉冲信号，之后通过串口获得秒脉冲对应的时间信息，再根据如上时间信息同步授时模块完成与同步授时中心模块的时间同步，并进一步与时间接收模块配合完成传输延迟时

间测量、同步授时及校正、通信数据发送等工作.

3.2　同步授时中心模块

同步授时中心模块是该同步授时系统的时间源，它管理高精度时间源、多路授时秒脉冲输出、多路串口通信端口，通过串口实现对多个同步授时模块的并行管理，即通过并行控制将时间信号以同步授时脉冲、时间信息发送至多路同步授时模块，从而完成整个系统的同步授时脉冲管理、时间数据发送等功能. 同步授时中心模块的结构见图 3.

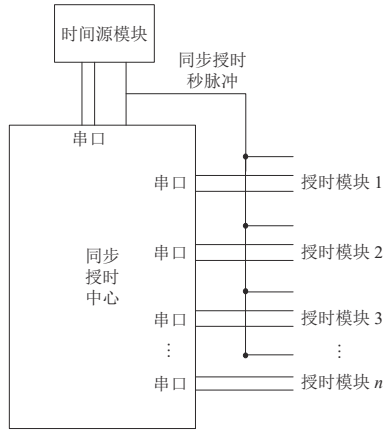

图 3　同步授时中心模块结构图

Fig. 3　Structure chart of synchronous time center mudule

3.3　同步授时模块

同步授时模块是同步授时系统中的一个关键模块，负责完成授时通道的授时脉冲传输时间测量及延时校正等功能，具体包括同步授时脉冲发送时间测量、经授时通道返回的同步脉冲时间测量、纳秒级定时器、同步授时脉冲及对应时间数据的编译、正常通信数据的收发管理等功能.

同步授时模块内部设计分为逻辑控制区、数据发送区、数据接收区和光电转换区，其原理图见图 4. 逻辑控制区包括控制器、定时器和时间测量，主要负责逻辑控制、同步授时脉冲发送和返回时间的测量；发送区包括通信数据缓存区和发送控制器，负责将正常通信信息对外发送，其中控制器具有发送使能功能(见 TxE 控制线)；接收区包括数据缓存区和接收控制器，负责时间接收模块端发送来的通信数据的管理，其中控制器有接收缓存的控制使能(见 RxE 控制线)；光电转换区为高度集成的光电收发一体接收器，支持高速远距离数据传输. 同步授时模块电路由高速 ARM 控制器、可编程器件、时钟管理模块、串口模块和光电转换模块组成. 通过高速可编程电路设计时间测量模块，实时测量同步授时脉冲的发送时间与返回时间，计算出该授时通道的全路径时间延迟值(图 1a). 具体步骤如下：① 以内部高精度高频时钟信号为源，用硬件逻辑编程设计纳秒级的定时器，在下一个授时秒脉冲到达前自动完成延迟校正的授时脉冲发送(图 1b)，从而达到补偿该授时通道的系统延时及光纤传输延

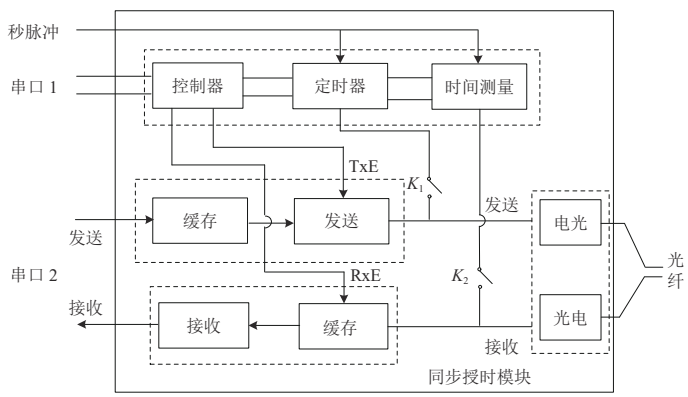

图 4　同步授时模块原理图

Fig. 4　Schematic diagram of synchronous timing module

时等；② 用硬件编程设计纳米级的定时器，对于两个授时秒脉冲之间的 1 s，采用同步授时模块的定时器及可编程器件进行精确延时，生成一个初值为$(1-t_a)$ s 的定时器；③ 启动定时器工作，当定时时间到达，由同步授时模块发出该通道同步授时脉冲；④ 该同步授时脉冲发出后，所对应串口发出该同步授时脉冲对应的时间值；⑤ 将同步授时脉冲及其时间数据嵌入正常通信数据，遵循通信协议命令经光电转换模块和光纤发送出去，且以时间同步脉冲电信号形式发送；⑥ 在同步授时脉冲发送前通过内部缓存器暂存正常通信数据，同步授时脉冲发送结束、停止数据缓存、恢复数据发送.

3.3.1 授时过程

当时间同步脉冲信号到来，时间信息依次写入控制器、定时器和时间测量等三个模块. 控制器通过 TxE 使能暂停其它通信数据发送，定时器关闭开关 K_1 和开关 K_2，时间同步脉冲经由 K_1 线路直接发送. 控制器通过 TxE 使能失效而恢复发送，定时器打开开关 K_1，发送时间数据和通信数据，带有同步脉冲标识的同步授时数据帧编译完毕.

3.3.2 延时校正过程

当返回时间同步脉冲信号到来，经由开关 K_2 直接送入时间测量模块，控制器通过 RxE 使能暂停数据接收. 返回时间同步脉冲信号结束，定时器控制开关 K_2 打开，控制器通过 RxE 使能恢复数据接收. 启动时间同步脉冲信号与返回时间同步脉冲信号的比较过程，即完成传输延迟时间测量，该时间延迟值存入定时器.

3.4 时间接收模块

时间接收模块是应用在远端待授时采集设备端的硬件模块，它自动识别同步授时脉冲信号和带有同步脉冲标志的时间数据帧，并提取同步脉冲信号、时间信息和数据信息，自动向光纤发送返回的同步脉冲信号，并向采集设备发送授时脉冲、时间数据及管理通信数据等. 同步时间接收模块必须与同步授时模块成对使用，完成一路数据采集设备的时间授时.

同步时间接收模块电路采用高速可编程器件及相关配件设计完成，主要包括控制器、接收区(缓存和接收)、发送区(发送和缓存)和光电转换区，同步时间接收模块的内部元件有 ARM 控制器、逻辑控制器、串口控制器、脉冲转发电路及高速光电收发一体接收器. 其中控制器可以通过使能信号 RxE 和 TxE 控制通信数据接收和发送的启停，也控制开关 K_a 和 K_b 的操作，接收同步授时脉冲信号以及返回同步授时脉冲信号. 同步时间接收模块的设计结构见图 5.

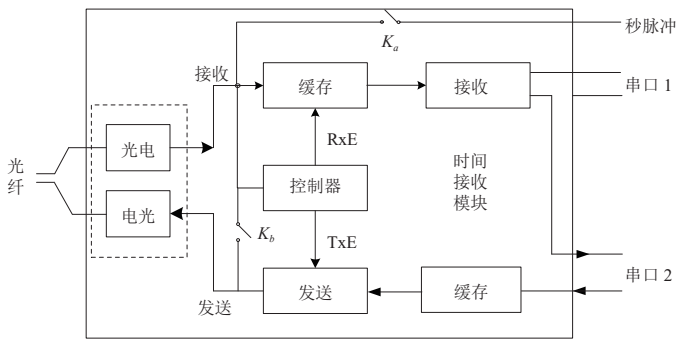

图 5 时间接收模块原理图

Fig. 5 Schematic diagram of time receiving module

同步授时脉冲信号经光电转换后到达控制器并完成授时脉冲识别后，控制器关闭脉冲控制开关 K_a 和发送数据控制开关 K_b，同步授时脉冲经由开关 K_a 线路被置入待授时采集器的秒脉冲输入端，同步经过接收串口将对应授时脉冲的时间数据送入时间数据传输串口．同时经控制开关 K_b 线路，直接通过光纤将该授时脉冲沿原传输路径返回，即该授时脉冲经电光转换、光纤、同步授时模块形成延时测量脉冲(返程的时间同步授时脉冲信号)．

同步授时脉冲信号到达控制器时，控制使能信号 RxE 和 TxE 暂停数据发送与接收．

同步授时脉冲信号发送结束后，控制器关闭，打开开关 K_a 和 K_b，控制使能信号 RxE 和 TxE 恢复数据发送与接收，一组接收时间同步脉冲工作时序结束．

3.5　同步授时系统工作时序

本文的时间同步授时系统虽由多个分立电路模块组成，但进行同步授时操作需要多组模块协同操作共同完成，各组模块分别完成自身通道的同步授时操作．

同步授时模块工作分为测量时钟校准(clock correction)、线路延时校准(delay correction)、同步信息发送和微帧数据发送几个步骤，其中：测量时钟校准是指利用时间同步信息调整和校准模块内的时钟误差；线路延时校准是指同步授时模块进行测量线路的延时，然后将其存储为下发同步授时秒脉冲信号时的补偿线路延时值；同步信息发送是指收到同步授时秒脉冲信号时，对其执行测量时钟校准算法和线路延时校准算法后再发送授时秒脉冲，以保证远端待授时设备收到的同步授时秒脉冲信号与同步授时中心的授时秒脉冲信号一致，其中同步授时秒脉冲信号嵌入授时秒脉冲信号，并且同步授时秒脉冲信号以硬件信号的形式进行收发；微帧数据发送则是指根据发送或接收信号的类型来确定串口缓存内部的通信数据发送与否．

时间接收模块工作包括配合同步授时模块校准线路延时(delay correction of synchronous time module，缩写为 DCS)、同步信息接收和微帧数据接收．配合同步授时模块校准线路延时(DCS)是指当同步授时模块申请测量线路延时的时候，时间接收模块无延时返回接收到的授时秒脉冲信号；同步信息接收是指时间接收模块识别出授时秒脉冲信号后，以硬件信号的形式无延时地把授时秒脉冲信号输出到授时秒脉冲输出端口，提取时间脉冲对应时间信息数据并将其发送到串口 1；当上述工作完成后，时间接收模块恢复微帧数据接收，并把收(发)的正常数据由串口 2 对应收发处理．同步授时系统工作流程图见图 6，在此流程下同步授时系统中各个模块中的授时脉冲时序见图 7．

此处以一路授时通道的同步授时工作时序为例介绍各模块中授时秒脉冲信号的工作时序．未进行同步授时操作时各个模块的时间脉冲工作时序见图 7a，图中 t_1 为同步授时模块发送脉冲延迟时间，该延迟

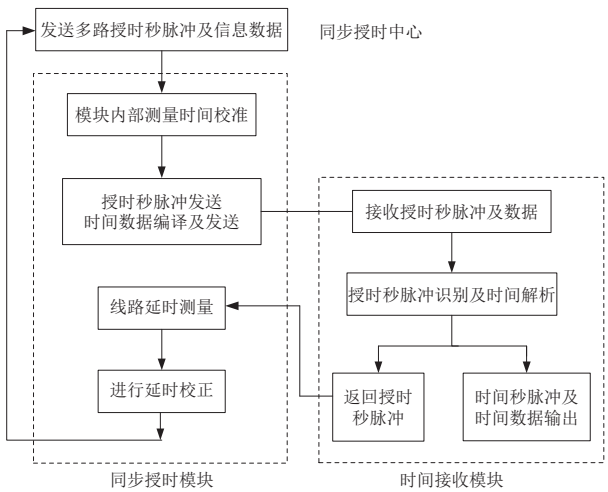

图 6　同步授时工作流程图

Fig. 6　Flow chart of synchronous timing program

时间内同步授时模块将完成上一微帧数据通信，然后停止数据通信；t_2 为同步授时模块授时秒脉冲信号在光纤中正向传输的延迟时间值；t_3 为授时秒脉冲从时间接收模块返回后在光纤中反向传输的时间延迟值，一般情况下 $t_2=t_3$. 当完成一次同步授时操作后，各个模块的时间脉冲将按照图 7b 所示的时序进行工作，从该时序图可以看出，时间接收模块端的秒脉冲已经与同步授时模块输出的秒脉冲信号达到同步.

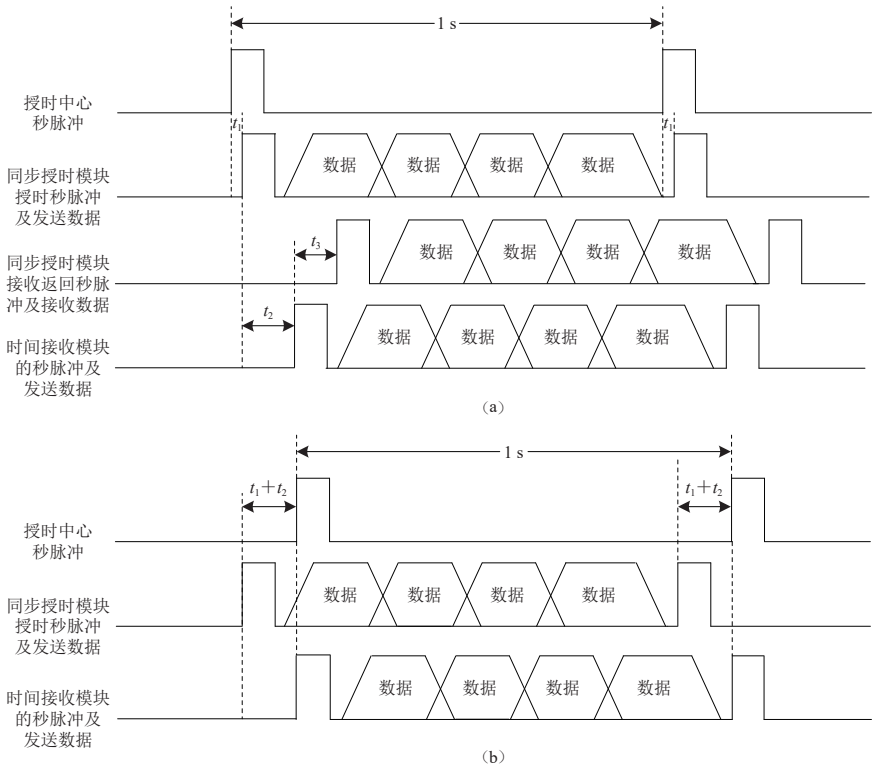

图 7 校正前(a)、后(b)的各模块时间脉冲时序图

Fig. 7 Uncorrected (a) and corrected (b) timing pulse sequence diagrams of each module

4 同步授时系统性能分析

基于以上技术研究，本文采用授时中心模块、同步授时模块、时间接收模块及通信光纤搭建了一套同步授时系统，并且以 GPS 授时模式作为授时中心模块的时间源，授时通道的通信光纤均采用 2 km 长的单模通信光纤. 启动该同步授时系统连续运行，采用高精度时间测量设备连续记录授时通道的授时脉冲及对应时间信息. 测试试验所使用通用计数器的频率范围为 10 Hz—1 300 MHz，其频率稳定度为 3×10^{-10}/s，电力专用卫星接收机的工作频率为 5 MHz 和 10 MHz，其稳定度为 1×10^{-11}/s. 同步授时系统工作时，定时器的时钟频率为 100 MHz，试验时实测得到光纤传输时间的延迟值 t_d 约为 20 μs，时间延迟校正值 t_a 约为 10 μs.

当授时中心模块的 GPS 信号有效后，该时间同步授时系统的同步授时工作启动. 此时记录授时中心模块输出的授时脉冲和各路通道时间接收模块的时间同步脉冲的连续测试时长为 1 h，在同次试验中相同条件下，同时采集三路通道的同步时间接收模块的时间同步脉冲，

分别统计授时中心模块输出的授时脉冲与各路通道时间接收模块的时间脉冲之差，以此时间差值作为各路授时通道的授时时间误差．图 8 给出了三路授时通道的授时时间误差，其中通道一、二和三的授时时间误差均方根值分别为 126.22 ns，129.19 ns 和 129.85 ns，三路通道的授时误差均方根值均低于 200 ns．

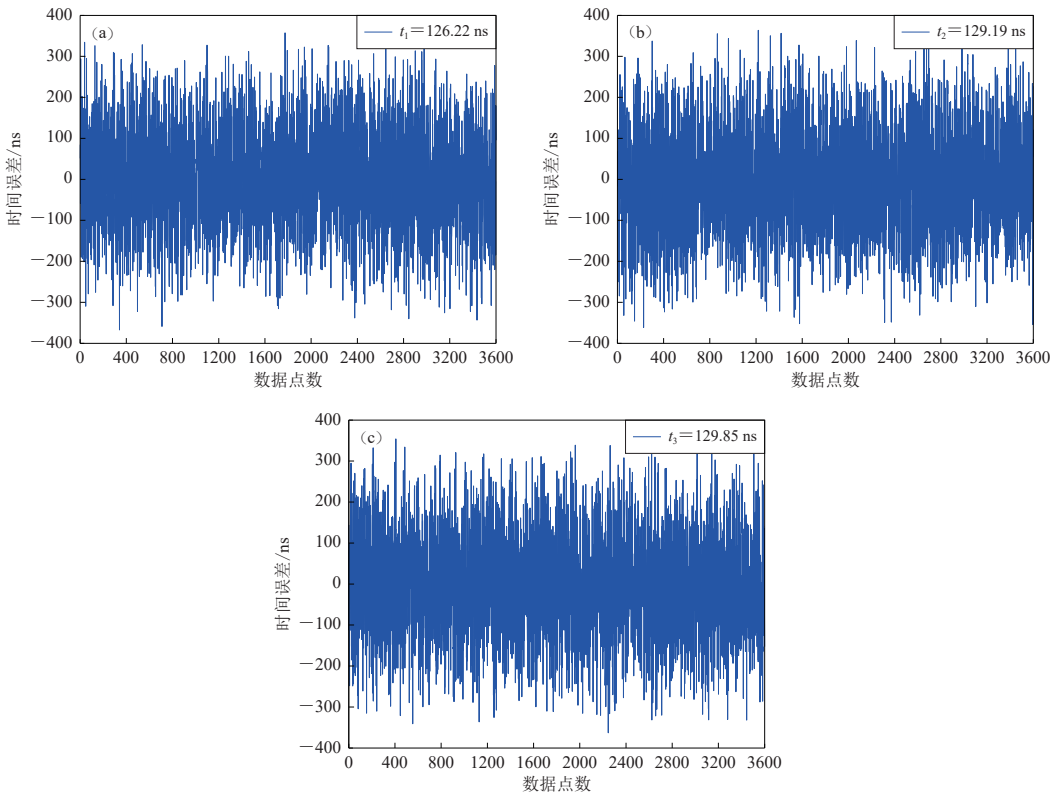

图 8　授时中心模块的授时脉冲与第一(a)、第二(b)和第三(c)通道时间接收模块的授时脉冲的时间差值数据曲线

Fig. 8　The time difference data curves between the timing pulse of the timing central module and the timing pulse of the first (a), second (b) and third (c) channel time receiving module

5 结论

本文采用时间同步授时技术研制了一套高精度时间同步授时系统，并搭建了一套同步授时实验系统进行了连续授时观测试验．对三路通道的同步授时脉冲的连续观测记录的分析计算结果表明，本文所研制的时间同步授时系统能够连续稳定工作，且在通讯光纤为 2 km 长时，其 1 h 连续观测记录的同步授时误差均小于 200 ns．该同步授时误差主要来源于两种硬件模块内部 ARM 控制器指令执行时间误差，具体为同步授时模块内部定时器计数溢出时向 ARM 控制器发出中断请求，当 ARM 控制器正在执行指令或中断服务程序时，该 ARM 控制器响应定时器溢出中断会产生延迟，对同步授时脉冲的发送造成影响．定时器计数溢出中断与 ARM 控制器响应该中断的时间误差具有非固定性特点，这种非固定性给误差分析、误差补偿也带来了困难．为控制发送同步授时脉冲时间的不确定性，后续还要选用

FPGA模块替代ARM控制器设计同步授时模块及时间接收模块的硬件电路，以降低模块操作时间不确定性所带来的同步误差，从而进一步降低同步授时系统的时间偏差.

参 考 文 献

郭长发. 2018. 基于FPGA实现1 PPS高分辨率检测的研究与实现[J]. 科技经济导刊，**26**(16)：6–8.

Guo C F. 2018. Research and implementation of 1 PPS high resolution detection based on FPGA[J]. *Technology and Economic Guide*，**26**(16)：6–8（in Chinese）.

刘辰，李小军，景冰冰. 2018. 基于强震动台阵记录的震源破裂长度实时估测方法[J]. 地震学报，**40**(3)：387–398.

Liu C，Li X J，Jing B B. 2018. Real-time estimation of rupture length of earthquake source based on records of strong motion array[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**40**(3)：387–398（in Chinese）.

马红皎，吴华兵，李梦，王康，武建锋，何在民，胡永辉. 2014. 一种双向测距与时间同步系统的设计与分析[J]. 时间频率学报，**37**(1)：18–24.

Ma H J，Wu H B，Li M，Wang K，Wu J F，He Z M，Hu Y H. 2014. Design and analysis of system of dual ranging and time synchronization[J]. *Journal of Time and Frequency*，**37**(1)：18–24（in Chinese）.

彭栋，郭伟. 2018. 安全网络授时服务技术研究[J]. 时间频率学报，**41**(1)：37–45.

Peng D，Guo W. 2018. Research of security network timing service technique[J]. *Journal of Time and Frequency*，**41**(1)：37–45（in Chinese）.

王向军，张亚元，张龙祥. 2016. 基于GPS和高精度实时时钟的时间同步方法[J]. 纳米技术与精密工程，**14**(1)：66–70.

Wang X J，Zhang Y Y，Zhang L X. 2016. Time synchronization based on GPS and high-accuracy real-time clock[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*，**14**(1)：66–70（in Chinese）.

魏丰，孙文杰. 2009. IEEE 1588协议时钟同步报文的精确时间标记方法研究[J]. 仪器仪表学报，**30**(1)：162–169.

Wei F，Sun W J. 2009. Precise time stamping method for IEEE 1588 clock synchronization message[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*，**30**(1)：162–169（in Chinese）.

翟学明，杨磊，杨亮. 2016. 基于FPGA的GPS同步授时与授时方案设计与实现[J]. 测控技术，**35**(5)：153–156.

Zhai X M，Yang L，Yang L. 2016. Design on a GPS timing and time keeping scheme based on FPGA[J]. *Measurement & Control Technology*，**35**(5)：153–156（in Chinese）.

Meng L，Allen R M，Ampuero J P. 2014. Application of seismic array processing to earthquake early warning[J]. *Bull Seismol Soc Am*，**104**(5)：2553–2561.