

基于 Aurora 协议光纤实时信号传输性能测试

鲁睿其^{1,2} 曾健平¹ 赵豫斌² 任海龙^{1,2}

1 (湖南大学 物理与微电子科学学院 长沙 410082)

2 (东莞中子科学中心 东莞 523808)

摘要 作为中国散裂中子源(Chinese Spallation Neutron Source, CSNS)谱仪之一的通用粉末衍射仪(General Purpose Powder Diffractometer, GPPD)采用二维位置灵敏探测器(Symptom Scale of Neurotransmitter Deficiency, SSND)探测中子入射位置和时间信息,并由后端电子学进行信号处理。中子信息以打靶时刻 T0 为时间参考点,电子学系统控制电路需要将接收到的 T0 信号低延迟、低抖动实时地传给下级电路。本文介绍了一种基于 Spartan6 系列 FPGA 的控制电路,采用 Aurora 协议通过光纤实时传输 T0 信号方案,并验证了此方案的可行性。

关键词 中国散裂中子源,通用粉末衍射仪,实时信号,抖动,Aurora 协议,光纤

中图分类号 TN41, TN492

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.030404

通用粉末衍射仪(General Purpose Powder Diffractometer, GPPD)是中国散裂中子源(Chinese Spallation Neutron Source, CSNS)首批建设的三台谱仪之一。GPPD 探测装置如图 1 所示。采用闪烁体及多阳极光电倍增管作为探测器^[1],由光电倍增管输出,经电子学系统获取到达探测器的中子飞行时间与位置信息,并将信息送到后端的数据获取系统(Data Acquisition System, DAQ)^[2]。

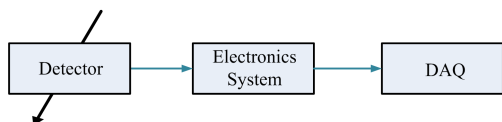


图1 GPPD系统探测装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of GPPD system detection device.

电子学系统主要包括:前端读出电子学、数据汇总电路、PCIE接口插卡以及控制电路,如图2所示。前端读出电子学对探测器送来的数据进行电荷放大、成形和甄别处理后得到数字数据,通过数据汇总电路对数据进行汇总,再由 PCIE 接口插件将汇总的数据存入 PC 机中,控制电路主要作用是接收外部系统的 T0 信号并传输给整个电子学系统。T0 信号是质子打靶产生中子的打靶时刻,也是计算中子飞行时间的起始时间,在电子学系统中 T0 信号作为时间参考点,控制电路需要将 T0 信号低延迟、低抖动实时地传输给数据汇总电路,并扇出给前端读出电子学。

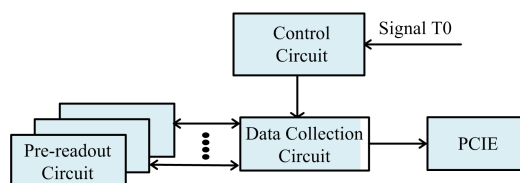


图2 电子学系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of electronics system.

根据系统设计要求, T0 信号的最大传输延迟为 1 μ s, 最大抖动为 0.1 μ s, 传输延时包括光纤的延时。若采用常规电缆进行 T0 信号的传输,性能上能满足实时传输要求,但数目众多的电缆铺设会给工程带来很大困难^[3],因此,设计中考考虑利用已有的光纤来传输 T0 信号。

美国 Xilinx 公司内嵌高速串行收发器 RocketIO 的 FPGA 可用以简化光纤传输硬件电路,而 Aurora 作为一个免费全开放的协议,既方便用户添加上层应用,又能适用于大多数内嵌高速串行收发器 RocketIO 的 Xilinx FPGA^[4]。Aurora 核提供了可直接与 FIFO 对接的用户接口,而其他协议需要用户自行编写 GTP 接口逻辑,逻辑端口复杂;同时 Aurora 核初始化的 Aurora 通道可传输任意大小的数据帧,且能在任意时刻打断,空缺的模块 Aurora 能自动填充,满足了来自前置放大器信号不连续的要求^[5]。本文提出利用 Aurora 协议光纤传输实时信号 T0 的方案,并对此方法传输性能进行了测试。

中国散裂中子源工程(发改高技(2008)2578号)、湖南省科技计划项目(No.2014GK3148)资助

第一作者:鲁睿其,女,1988年出生,2012年毕业于湖南大学,现为湖南大学硕士研究生,研究方向为FPGA硬件开发

收稿日期:2014-12-08,修回日期:2015-01-07

1 硬件系统介绍

控制电路硬件系统主要由 FPGA 主控模块、时钟模块、电源模块、信号接入模块、SFP (Small Form-factor Pluggable) 光纤收发模块组成, 此外电路还设计了 USB2.0 接口, 丰富接口模式以便适应不同应用环境, 控制电路硬件如图 3 所示。

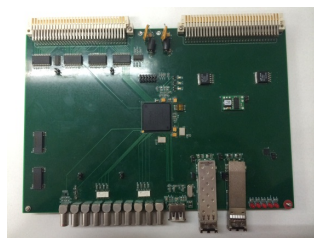


图 3 控制电路硬件图
Fig.3 Schematic of control circuit hardware.

FPGA 采用 Xilinx 公司的 Spartan6 系列的 XC6SLX75T, 该型号 FPGA 内置 RocketIO GTP 可提供最高 $3.125 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 、最低 $614 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 的传输速率, 加入 Platform Flash PROM XC32P 对 FPGA 进行配置, 使系统程序加载更加简化。

本电路设计两套独立的时钟系统, 均选用日本 EPSON 公司的 EG-2121 型号的晶振, 提供 100 MHz 差分时钟, 分别作为系统时钟和 GTP 参考时钟。

使用 VME 机箱提供 +5 V 和 +3.3 V 电源, 经电源芯片转换成 2.5 V、1.8 V 和 1.2 V 电压供电路板使用。考虑到 RocketIO 对噪声非常敏感, 采用单独的电源芯片为 RocketIO 收发器的 MGTAVCCPLL 提供 1.2 V 电压。

信号接入模块是由 LEMO 接入实时信号 T0。

SFP 光纤收发模块选用美国 Finisar 公司的 FTLF852P2BCV-QL 光电转换器。

2 性能测试

测试平台由 VME 机箱、信号发生器、示波器及控制电路构成, 采用 ISE Design Suite14.4 作为 FPGA 开发平台, 由于现场安装光纤长度不超过 15 m, 本测试所选用的光纤为 15 m, 如图 4 所示。

2.1 光纤接口测试

2.1.1 硬件测试

Xilinx 的 ChipScope Pro 提供了误比特率测试核 (Integrated Bit Error Ratio Tester, IBERT)。IBERT 核用于测量高速串行收发器多条通道上的误码率和实时调整高速串行收发器参数。连续运行 1 h IBERT 测试界面如图 5 所示。MGT 设置选用的外部 RX AC 耦合使能, RX 终端电压为 3/4 MGTAVTTRX, RX

的采样点是 0.504UI, Loopback Mode 设置为开环模式。从 IBERT 测试界面可以看出, 锁相环 PLL 处于 Locked 状态, 表明 GTP_DUAL 的 PLL 已锁定 GTP 的参考时钟, GTP 可正常工作, 如果状态是 Unlocked, 则要检测待测 GTP 链路是否运行正确。在预加重为 0 dB 和与均衡为 -0.3 dB 条件下, 强制 GTP 发送 31 位的伪随机数, 当 RX 接收数据量为 6.063×10^{12} 时 lane0 的误码率为 1.649×10^{-13} , 当 RX 接收数据量为 6.061×10^{12} 时 lane1 的误码率为 1.650×10^{-13} , 且传输错误率为 0, 可判断光纤接口硬件设计正确, lane0 和 lane1 光纤通道信道质量好, GTP 收发器能够正常工作, 达到光纤传输信号标准。

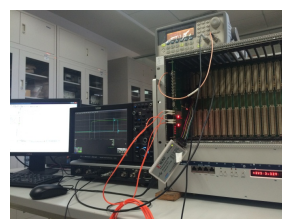


图 4 测试平台图
Fig.4 Test platform figure.

	GTPA1_DUAL_X0Y0_0	GTPA1_DUAL_X0Y0_1
MGT Settings		
MGT Alias	DUAL0_0	DUAL0_1
Title Location	GTPA1_DUAL_X0Y0	GTPA1_DUAL_X0Y0
MGT Link Status	2.0 Gbps	2.0 Gbps
Line Rate	2.5 Gbps	2.5 Gbps
PLL Status	LOCKED	LOCKED
Loopback Mode	None	None
DUAL Reset	Reset	Reset
TX Polarity Invert	☐	☐
TX Error Inject	Inject	Inject
TX Diff Output Swing	205 mV (UUUU)	205 mV (UUUU)
TX Pre-Emphasis	0 dB (UUU)	0 dB (UUU)
RX Polarity Invert	☐	☐
RX AC Coupling Enable	☐	☐
RX Termination Voltage	3/4 MGTAV11TX	3/4 MGTAV11TX
RX Equalization	-0.3 dB (UU)	-0.3 dB (UU)
RX Sampling Point	64 0.504 UI	64 0.504 UI
BERT Settings		
TX Data Pattern	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit
RX Data Pattern	PRBS 31-bit	PRBS 31-bit
RX Bit Error Ratio	1.649E-013	1.650E-013
RX Received Bit Count	6.063E012	6.061E012
RX Bit Error Count	0.000E000	0.000E000

图 5 IBERT 测试界面
Fig.5 IBERT test interface.

2.1.2 Aurora 协议测试

本电路中 Aurora 协议采用单工模式, 帧控形式数据传输, 参考时钟为 100 MHz, 用户时钟为 125 MHz, 发送和接收数据位宽均为 16 bits, 线速度为 $2.5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于光纤数据传输经过 RocketIO 收发器采用 8B/10B 数据编码, 传输数据效率是 80%, 故而通道串行数据传输有效线性速率为 $2.0 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$ 。运用 Aurora 核, 自定义了 TX_FRAME_GEN 和 RX_FRAME_CHECK 模块, 前者用于 FIFO 和数据发送的逻辑转换, 后者是数据接收模块。

使用 Aurora 协议测试硬件程序包括发送和接收验证两部分，发送模块通过 TX 发送确定的数据包，经过光纤传输到 RX 端接收。通过 ChipScope

抓取发送和接收数据，观察可知 Aurora 协议传输数据没有出现丢数和误传的现象(图 6)，fifo_d_o 表示发送端数据，rxdata_out 表示接收端数据。

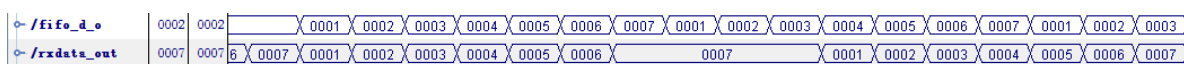


图 6 Aurora 协议验证 ChipScope 截图

Fig.6 Screenshot of the verification of ChipScope via Aurora protocol.

2.2 信号性能测试

测量接收端相对于发送端的信号延迟和抖动以检测信号传输性能，测试方案如图 7 所示。

由波形发生器模拟产生 T0 信号，经 FPGA 信号处理后存入 FIFO 中，通过 FIFO 对数据的存取实

现光纤对数据的收发，再由光纤自接收，通过 FPGA 产生 T0 恢复信号。利用高精度示波器测量恢复信号与输入 T0 信号的时间差得到信号的传输延迟，多次统计测量计算得出信号传输的抖动。

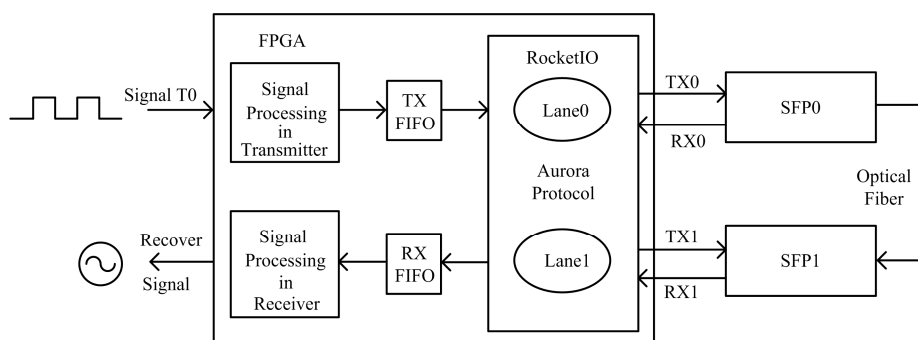


图 7 测试方案框图

Fig.7 Block diagram of test scheme.

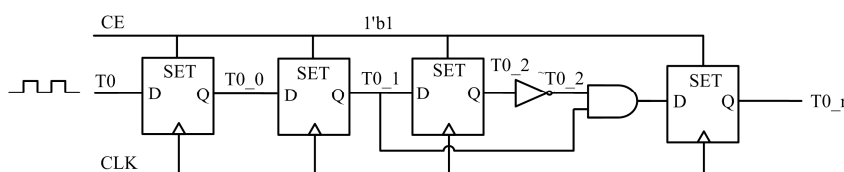


图 8 提取输入信号上升沿信息逻辑框图

Fig.8 Logic diagram of extracting rising edge information from input signal.

FPGA 内部信号处理包括提取输入 T0 信号上升沿和去抖动两部分。提取输入 T0 信号上升逻辑框图如图 8 所示，输入 T0 信号是由信号接入模块进入的模拟信号 T0，T₃ 为提取的上升沿信号，时序图如图 9 所示。由图 9，提取的上升沿信号较原始信号有不超过三个时钟周期的延迟，鉴于采用的提取时钟为 125 MHz，信号延迟不超过 24 ns，相对于电子学的延迟不超过 1 μs 的要求可以忽略不计。去抖动是指系统在接收到一个上升沿信号后，在一定的时间内不再接收输入信号。

T0 信号是一种脉冲波，频率为 25 Hz，占空比为 50%，电平标准为 TTL，高低电平分别为 3.3 V 和 0 V，模拟 T0 信号由 Agilent 的 33 250 A 80 MHz

波形发生器产生。本设计模拟 5 ns 和 10 ns 上升时间 T0 信号，图 10 为示波器显示的模拟 T0 信号。

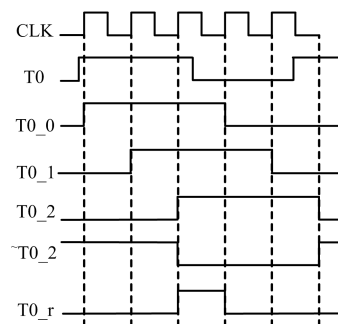


图 9 提取输入信号上升沿信息时序图

Fig.9 Timing diagram of extracting rising edge information from input signal.

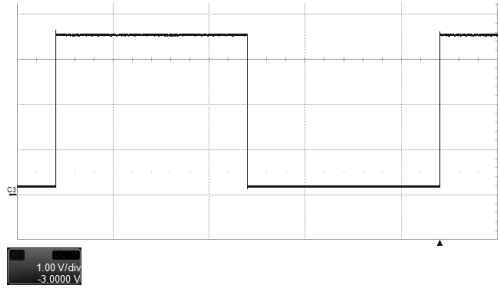


图 10 模拟 T0 信号波形图
Fig.10 Waveforms of T0.

上升沿信号对应 Aurora 协议 RX_FRAME_CHECK 模块的 Datavaild 信号, 该信号为单周期信号。由于光纤接收和发送都采用的用户时钟 125 MHz, 因此上升沿信号有效时间为 8 ns, 为方便示波器采样, 将一个周期的上升沿信号扩展为 10 个周期, 用 T_Recover 表示。信号抖动由示波器统计测量得出, 计算输入 T0 信号和 T_Recover 的延迟的标准方差(Standard Deviation, Sdev)便得到输入信号的传输抖动, 计算公式如下:

$$Sdev(T_0) = \sqrt{\frac{(T_{(T_0_r)_1} - T_{T_0})^2 + (T_{(T_0_r)_2} - T_{T_0})^2 + \cdots + (T_{(T_0_r)_{N-1}} - T_{T_0})^2 + (T_{(T_0_r)_N} - T_{T_0})^2}{N}} \quad (1)$$

式中, Sdev(T0) 为输入信号抖动; $T_{(T_0_r)_1}, T_{(T_0_r)_2}, \cdots, T_{(T_0_r)_{N-1}}, T_{(T_0_r)_N}$ 为 T_Recover

的延迟时间, T_{T_0} 为输入信号上升沿的时间; N 为测量次数。测试波形如图 11 所示。测量的多组数据结果见表 1。

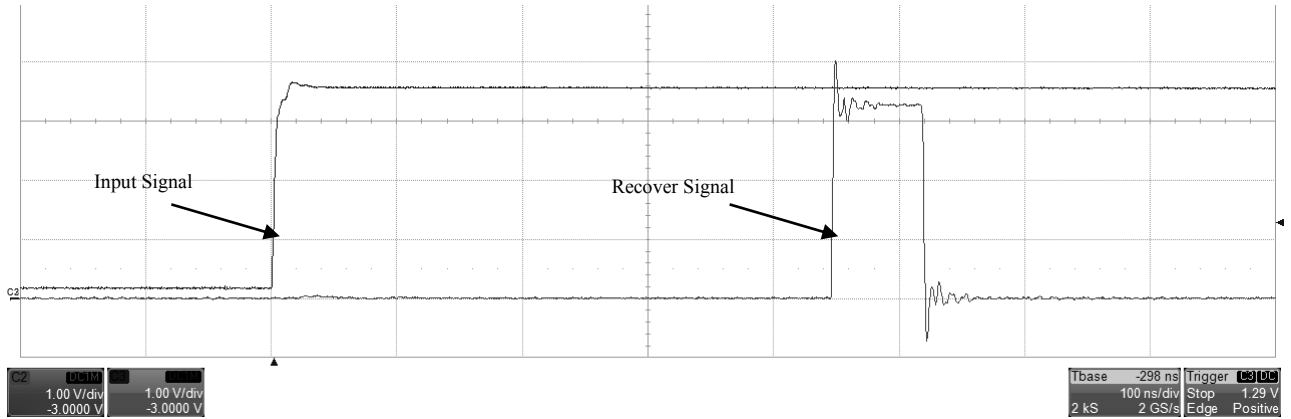


图 11 信号抖动测试波形图
Fig.11 Waveforms of signal jitter test.

表 1 Aurora 协议传输测量结果
Table 1 Results of Aurora protocol transmission measurements.

测量组数 Number	上升时间 Rising time / ns	最大延迟 Maximum delay / ns	最小延迟 Minimum delay / ns	平均延迟 Average delay / ns	抖动 Jitter / ns
1	5	547.32	478.24	489.95	2.96
2	5	548.62	479.78	489.94	3.10
3	5	544.63	479.39	489.88	2.99
4	20	560.84	489.88	501.57	3.19
5	20	561.00	491.42	501.51	3.00
6	20	556.66	489.47	501.63	3.12

2.3 测试结果

通过每组 5 000 次的多组信号性能测量结果可以看出, 传播延迟最大不超过 600 ns, 抖动最大不超过 4 ns, 且延迟和抖动稳定性较好, 均能满足系统要求。

3 结语

基于 Aurora 协议进行光纤传输 T0 信号的方式能够满足电子学系统对实时信号传输的要求。测量结果表明, 信号上升时间对延迟和抖动有一定影响, 信号上升时间越长则延迟越长, 抖动越大, 可通过缩短信号上升时间降低传输延迟和抖动。

参考文献

- 1 Wei J, Fang S X, Feng J, *et al.* China spallation neutron sources design[C]. Proceedings APAC 2007, Indore, India, 2007: 310–314
- 2 胡俊, 朱科军, 江晓山. 基于 PCIE 的 CSNS 高通粉末衍射仪高速数据采集卡[J]. 核电子学与探测技术, 2011, **31**(10): 1062–1072
HU Jun, ZHU Kejun, JIANG Xiaoshan. The data acquisition card of high-throughput powder diffractometer in CSNS[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, **31**(10): 1062–1072
- 3 徐昊, 刘振安, 卢云鹏, 等. 基于 FPGA 的高速串行光纤数据传输在 BESIII 触发系统的应用[J]. 核技术, 2009, **32**(9): 706–710
XU Hao, LIU Zhen'an, LU Yunpeng, *et al.* Application of FPGA-based high-speed data transmission with optical fiber in trigger system of BESII[J]. Nuclear Techniques, 2009, **32**(9): 706–710
- 4 Xilinx Inc. Spartan-6 FPGA GTP transceivers[CP/OL]. <http://www.xilinx.com>, April 30, 2010
- 5 Xilinx Inc. Aurora_8B10B protocol specification[CP/OL]. <http://www.xilinx.com>, April 19, 2010

Real-time signal transmission performance tests with optical fiber based on Aurora protocol

LU Ruiqi^{1,2} ZENG Jianping¹ ZHAO Yubin² REN Hailong^{1,2}

¹(The Physics and Micro Electronic College of Hu'nan University, Changsha 410082, China)

²(Dongguan Institute of Neutron Science (DINS), Dongguan 523808, China)

Abstract Background: General Purpose Powder Diffractometer (GPPD) is one of Chinese Spallation Neutron Source (CSNS) diffractometers, which adopts Symptom Scale of Neurotransmitter Deficiency (SSND) detecting the position and the flight time of neutron when it hits, and the electronics system processes the detected neutron information. The shooting time T0, as a time reference point of the electronics system, is a real time signal. Traditional cable transmission meets the real-time signal transmission requirements, however, laying work will be rather complex and bring great difficulties to project since numerous of cable was needed. **Purpose:** The electronics control circuits is needed to transfer the received signal T0 to the lower electronics in real time with low propagation delay and low jitter via optical fiber, and the the propagation delay is less than 1 μ s which including the 15-m optical fiber delay, the jitter is less than 0.1 μ s. **Methods:** This paper describes a transferring scheme based on Spartan6 XC6SLX75T FPGA using Aurora protocol via optical fiber. The testing program is based on ISE Design Suite14.4 FPGA development platform, adopting high-precision oscilloscopes to the measure and calculate the transmission delay and jitter of different rise time signal T0 repeatedly. **Results:** Repeated measurements show that the maximum propagation delay is less than 600 ns and that the maximum jitter is less than 4 ns, in addition, the stability of jitter stability is good, and it meets the system requirements. **Conclusion:** It is feasible to use Aurora protocol via optical fiber to transfer real-time signal T0. Signal rise time has a certain influence on the delay and jitter, longer signal rise time corresponds longer delay and greater the jitter, so to shorten rise time of signal can reduce the transmission delay and jitter.

Key words Chinese Spallation Neutron Source (CSNS), General Purpose Powder Diffractometer (GPPD), Real-time signal, Jitter, Aurora protocol, Optical

CLC TN41, TN492