

doi: 10.7690/bgzdh.2026.06.011

基于光纤传输的模拟信号远程复现装置

吴自佳, 张 荣, 李 翀, 毛勇建

(中国工程物理研究院总体工程研究所环境试验技术与应用研究中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决模拟信号远程传输复现中数据量大、距离远、实时性高的问题, 设计一种基于光纤传输的模拟信号远程复现装置。采用高精度 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号, 基于 FPGA 内嵌的 RocketIO 模块将数字信号组帧打包处理, 再将信号加载至 SFP 光纤收发模块中, 通过光纤向远端发送出去。在模拟信号接收再现模块中, 采用 SFP 光纤收发模块实现信号的接收, 通过 FPGA 的 RocketIO 模块对接收的信号进行解码拆帧, 由高精度 D/A 转换器和滤波电路处理后同步复现出 8 路模拟信号。结果表明: 该装置可实现多通道模拟信号的高速同步采集, 并实时传输到远端复现, 适合于分布式试验各设备之间多通道模拟信号远程实时交互。

关键词: 远程测控; 光纤通信; 模拟信号; 数据采集; 信号复现

中图分类号: TN911.71 **文献标志码:** A

Analog Signal Remote Reproduction Device Based on Optical Fiber Transmission

Wu Zijia, Zhang Rong, Li Chong, Mao Yongjian

(Environmental Testing Technology and Application Research Center, Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problems of large amount of data, long distance and high real-time in the remote reproduction of analog signals, an analog signal remote reproduction device based on optical fiber transmission is designed. A high-precision A/D converter is used to convert analog signals into digital signals, and the RocketIO module embedded in FPGA is used to frame and pack the digital signals, and then the signals are loaded into the SFP optical fiber transceiver module and sent to the remote end through the optical fiber. In the analog signal receiving and reproducing module, the SFP optical fiber transceiver module is used to receive the signal, and the RocketIO module of FPGA is used to decode and unframe the received signal, and the high-precision D/A converter and filter circuit are used to process and reproduce eight analog signals synchronously. The results show that the device can realize the high-speed synchronous acquisition of multi-channel analog signals and real-time transmission to the remote reproduction, which is suitable for the remote real-time interaction of multi-channel analog signals among distributed test equipment.

Keywords: remote measurement and control; optical fiber communication; analog signal; data acquisition; signal reproduction

0 引言

在部分大型复杂环境试验中, 需采用分布在不同地点的多台套振动环境试验设备开展部件级和整体级试验。这些环境试验设备分布在不同的地点, 各试验设备间进行关键信号的实时交互测控, 需对模拟信号进行精确采集后进行远程传输。如采用电缆直接互联传输信号可能会因为模拟信号传输距离远引起幅值衰减、线路干扰、相位严重滞后等问题而无法实现; 因此, 要实现分布式试验技术, 必须要解决典型电气信号远距离传输稳定可靠的问题。针对这一问题, 国内已有相关研究。文献[1]设计了基于以太网的远程双通道信号采集传输装置, 采用 FPGA 和高速 AD 设计双通道模拟信号采集模块, 基于 UDP 传输协议和千兆网络芯片实现数字信号

的远程传输。该系统实现了多通道远程信号的采集与复现, 但这种基于以太网的传输方式存在网络配置复杂、网络延迟不确定以及网络堵塞等问题。文献[2]基于 ADAM4000 系列模块构建远程测控系统, 采用 RS485 总线转光纤再转 RS485 总线的方式实现较分散工业现场的多点数据采集与设备控制, 但只适合于变化较慢的信号采集以及时序控制要求在毫秒量级的测试场景。文献[3]和[4]分别基于 CAN 总线、云平台实现了车辆多个状态参数的远程采集传输与显示。文献[5]基于 RS485 转无线传输实现了桥梁多个状态参数的远程采集与监测。但 CAN 总线具有传输距离近、速率低的问题, 无线传输具有数据丢包、网络传输延迟的问题。文献[6-7]基于 RS485 总线建立有线数据采集网络, 以 FPGA 为主控芯片, 高精度采集芯片 ADS1258 为模数转换模块, 实现了

收稿日期: 2024-12-05; 修回日期: 2025-01-12

第一作者: 吴自佳(1991—), 女, 湖北人, 硕士。

多点处模拟信号的精确采集及远程传输，但这种基于 RS485 总线的传输方式存在传输距离近、传输速率低的问题。笔者提出了一种基于光纤传输的模拟信号远程传输复现方法。光纤通信技术具有传输距离远、抗干扰能力强、线路衰减低、可靠性高的优点^[8]，能够满足分布式测试对数据传输的要求。通过采用高精度 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号，基于 FPGA 内嵌的 RocketIO 接口将信号加载至光纤模块，通过光纤将信号传输到远端复现，解决了模拟信号远程传输复现中数据传输数据量大、距离远、实时性高的问题。

1 整体方案设计

模拟信号远程复现装置由模拟信号发送模块和模拟信号接收再现模块 2 部分组成，模拟信号远程复现装置的总体功能如图 1 所示。

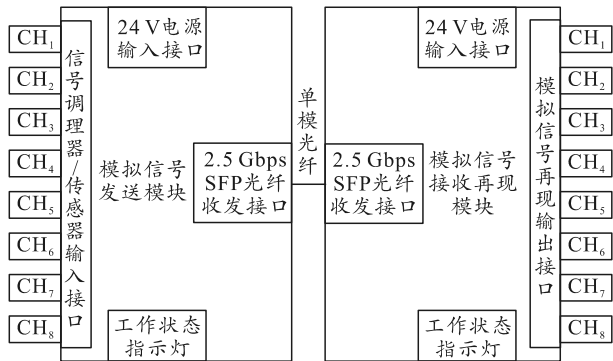


图 1 模拟信号远程复现装置

模拟信号发送模块负责对 CH₁~CH₈ 8 路模拟信号进行信号跟随调理和高精度采集，并进行组帧打包后通过 2.5 Gbps 光纤发送至远端的模拟信号接收再现模块。模拟信号接收再现模块对光口接收的信号进行解码拆帧后同步复现出 CH₁~CH₈ 共 8 路模拟信号。

2 系统设计

1) 如图 2 所示，模拟信号发送模块主要功能为：将待传输的模拟信号进行信号处理，并通过光纤模块进行远程实时传输。

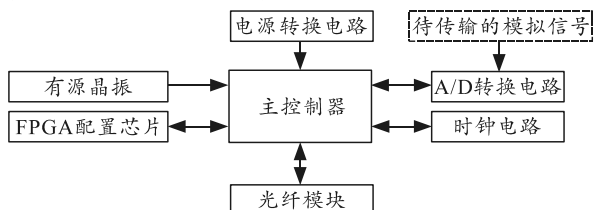


图 2 模拟信号发送模块原理

由图 2 可知：模拟信号发送模块主要由主控制

器、电源转换电路、时钟电路、A/D 转换电路、光纤模块等组成。

2) 模拟信号接收再现模块主要功能为：将光纤模块接收到的数字信号进行拆分处理，并同步恢复出对应各通道的模拟信号，如图 3 所示。

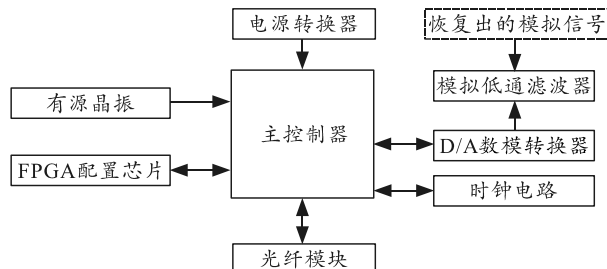


图 3 模拟信号接收再现模块原理

由图 3 可知：模拟信号接收再现模块原理主要由 FPGA 高速接口器件、SFP 光纤收发模块、时钟电路、D/A 转换电路、模拟低通滤波器、电源转换器、FPGA 配置芯片组成。分布式试验应用时，将 8 路模拟信号接入模拟信号发送模块，模拟信号发送模块内的 FPGA 高速接口器件驱动 8 通道高精度同步 A/D 模数转换器对输入的模拟信号进行采样，形成数字信号，送入 FPGA 的 FIFO 缓冲区。FPGA 将 FIFO 的数据按照 8 通道信号为一帧，加上帧头同步信号和非平衡 K 码后，并行送至 FPGA 的 RocketIO 高速串行发送接口，执行数据并串转换。并串转换后传输速率为 2.5 Gbps，通过 LVDS 接口加载至 SFP 光纤收发模块中向远端发送出去。在装置信号复现终端，FPGA 通过 RocketIO 的同源时钟检测，去除同步时钟码，执行高速数字码流的串并转换。去除自定义的数据同步帧后，解码出 8 个通道的数字信号，将该 8 个通道的数字信号同时分发到 8 个高精度的 D/A 转换器中执行同步 D/A 转换，使数字信号转换为模拟信号。转换后的模拟信号存在不连续的台阶和偶次谐波现象，在其后增加高性能的二阶模拟低通滤波器，使复现后的模拟信号连续，即实现了 8 路模拟输入信号的远距离传输与复现。将复现终端输出的模拟信号与振动控制计算机或振动测试计算机的数据采集系统模拟输入通道直接相连，即实现了近端实时采集远端模拟信号的目的。

2.1 A/D 转换电路设计

A/D 转换电路主要功能为将待传输的 8 路模拟信号进行高精度同步采样，采用高精度 A/D 转换器来实现。选用的 A/D 转换器具有 16 位采样分辨率，

最高采样频率为每个通道 800 kHz,共包含 8 个 ADC 采样通道,每个通道均为同步采样模式。系统输入阻抗为 5 mΩ,高输入阻抗使其在接入模拟信号时不需设计跟随阻抗变换电路。该芯片采用单 5 V 直流电源供电,工作温度为-40~+125 °C,信号输入范围:±5、±10、±2.5 V 可编程设置。同时配备过采样 OSR 选项,可进行 OSR×256 过采样,从而实现芯片内部对采样信号的二次数字滤波。具有真双极性模拟信号输入模式,信噪比达 89.5 dB,谐波失真

度达-105 dB,积分非线性为±2 LSB,差分非线性为±1 LSB,SPI 总线接口驱动。A/D 转换芯片采用 SPI 总线与 FPGA 控制器进行通信,涉及的控制信号主要包括:片选信号 CS、数据读信号 RD、首字节信号 FRSTDATA、启动转换信号 CONVST、转换忙信号 BUSY 以及 16 位的数字信号 Dout。为实现 FPGA 对 A/D 转换器的精确控制,采用 Verilog 硬件描述语言编写 A/D 转换器的驱动代码,工作时序如图 4 所示。

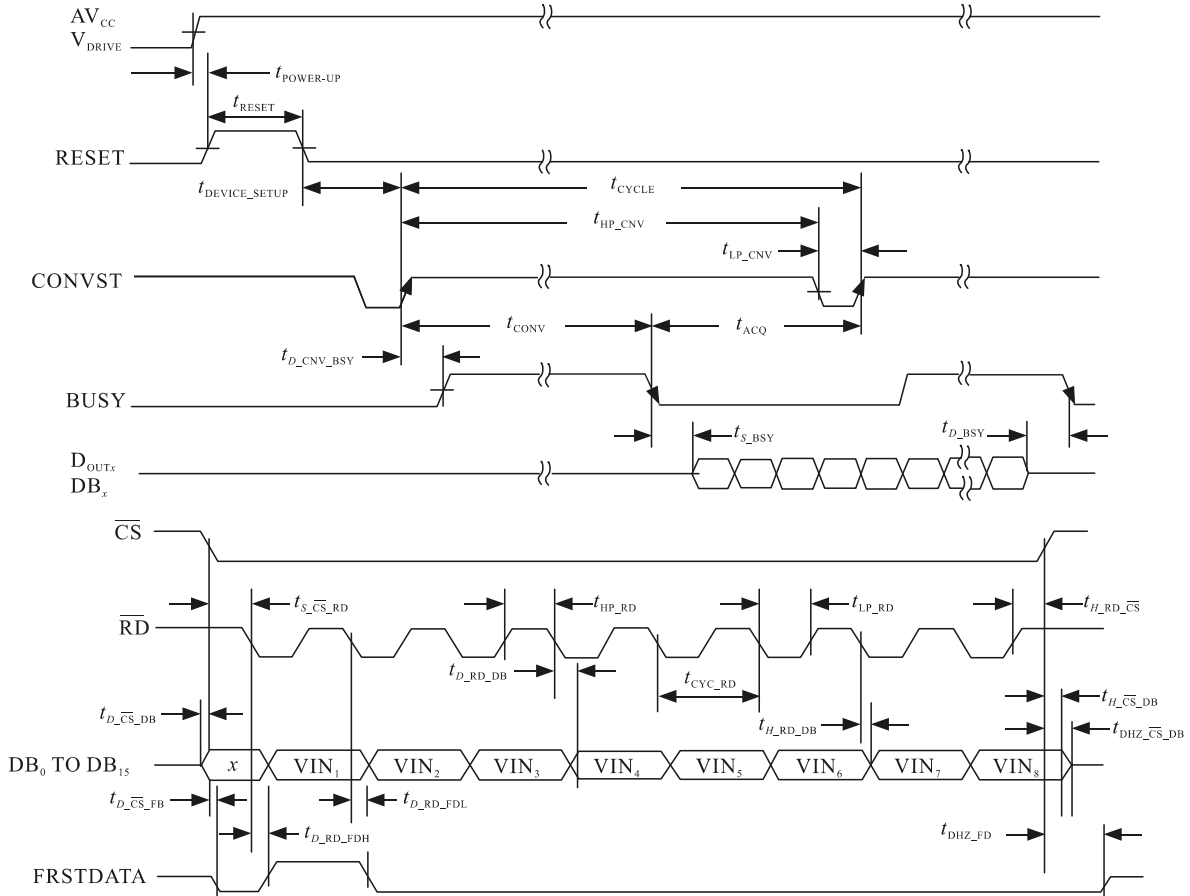


图 4 A/D 转换器驱动时序

由图 4 可知:采用 FSM 有限状态机进行驱动软件设计,设计时,主状态机时钟采用 50 MHz 的系统时钟,状态变量设计为 AD_ST,状态总数为 24 个,分别定义为 AD_S0~AD_S23;其中 AD_S0 用于 AD 转换器的状态复位参数设置,AD_S1~AD_S8 根据 BUSY 信号完成数据采集,AD_S9~AD_S23 完成采样数据打入 FIFO 缓冲存储的操作。

2.2 SFP 光纤模块

SFP 光纤模块采用单模 FC 接口光纤传输器件,该器件为具有 FC 接口的单芯单模光电转换模块,传输速率可达 3.125 Gbps。TX/RX 光收发波长分别

为 1 310 或 1 550 nm,供电为 3.3 V,信号采用 LVDS 高速差分接口模式,满足与 FPGA 的 RocketIO 接口的直接互连电性要求。

2.3 主控制器

主控制器主要负责 A/D 芯片和 SFP 光纤收发模块的时序逻辑驱动。选择 XILINX VIRTEX4 系列的 FPGA 器件作为主控制器,该器件特征为:采用 Virtex4 低功耗架构设计,内核电压为 1.2 V;包含 5 184 kbit RAM 资源,可构成大容量双口 RAM 或 FIFO 存储器,12 个 DCM 锁相环时钟,提供低抖动低漂移多种时钟输出;12 个高速 RocketIO 接

口, 可实现 622~6 500 Mbps 的高速串行 LVDS 信号传输, 支持 XAUI 协议、光纤传输协议与自定义数据传输等多种协议, 系统设计时采用自定义数据传输协议; 同时支持 LVDS、LVTTTL 等多种 IO 电平标准, 最大时钟频率为 600 MHz, 满足系统时序逻辑控制需求。

2.4 RocketIO 高速串行通信设计

系统采用 RocketIO 实现高速光纤串行数据传输。RocketIO 是 FPGA 芯片内部集成的可编程串行收发器, 采用 2 对差分对进行数据的发送和接收, 其数据传输码流速度为 150~6 500 Mbps^[9]。具备可编程预加重和预均衡功能, 支持 8 b/10 b 编解码机制, 提供光纤传输协议、PCI-E 协议以及用户自定义协议等。RocketIO 包括物理媒质适配 (PMA) 和物理编码子层 (PCS) 2 个子层。其中 PMA 子层主要实现串并互相转换, PCS 主要包括线路编码和 CRC 校验编码。PMA 子层包括串/并与并/串转换模块、缓冲模块和时钟管理器模块等电路。PCS 子层实现数据编码、时钟修正与通道绑定等功能。数据编码将发送数据进行 8 b/10 b 编码, 消除线路中的直流分量, 接收端根据发送数据流的跳变恢复出发送时钟, 此外, 8 b/10 b 编码利于数据的对齐和同步^[10]。

在 RocketIO 高速发送端, 完成发送编码器、数据缓冲器、扰码器、串行器和差分驱动器连接, 实现 FPGA 内部并行数据打包串行输出; 在接收端, 完成差分接收器、解串器与接收数据缓冲器的连接, 实现将串行数据转换为 FPGA 可处理的并行数据。

系统设计时, RocketIO 收发模块的主频采用 2.5 Gbps, 将 20 MHz 无源晶振时钟通过模拟锁相环转换为 250 MHz 的 RocketIO 外部驱动时钟, 再由其内部锁相环机制倍频为 2.5 Gbps 的收发 LVDS 时钟。

在装置的发送端, FPGA 控制 A/D 转换器的 8 个通道同步采集 8 个 16 位测试信号, 然后将 8 路信号通过 FIFO 缓冲存储后打包加载到 RocketIO 串行发送端, 发送时采用 8 b/10 b 编码模式, 每 64 个字节进行一次发送对齐校验与检测, 对齐码选择 16 进制的 K 码 “BC”, 发送端直接与 SFP 光纤模块的 LVDS 接口相连。

在装置的 SFP 接收端, 利用 RocketIO 将接收的高速串行信号转换为并行信号, 解除对齐用 K 码, 将并行数据存储于 FIFO 中。

2.5 高速传输信号同步协议设计

高速串行收发须进行数据的同步和对齐设计, 需制定信号同步传输协议, 确保数据传输的正确性。在装置样机设计时, 对于信号传输过程的字节对齐处理, 主要采用插入 K 码来实现, K 码选择为单字节 “BC”, “BC” 属于非平衡码, 在 RocketIO 发送数据时, 每 64 个字节插入一个 “BC” 码, 同时置 TXCHARISK 发送对齐标志为 “1”, 在 RocketIO 接收端, 检测 RXCHARISK 接收对齐标志是否为 “1”, 若为 “1” 则表明当前数据码为 K 码, 而非真实测控信号码, 故舍弃。

对于信号同步的设计, 采用自定义协议完成。协议等定义 8 个通道的测试数据为 CH₁Data、CH₂Data、CH₃Data、CH₄Data、CH₅Data、CH₆Data、CH₇Data、CH₈Data, 8 个通道的信号数据组成一个数据帧。传输前, 每帧数据帧前插入同步起始码 “9AAB”, 数据帧尾插入同步停止码 “5D9E”。数据接收端不停地将数据存放在接收 FIFO 中, 并对数据按帧格式进行正确性校验。一旦检测到 “9AAB” 码后将连续读取 8 个字节数据, 在第 9 个数据上检测是否为 “5D9E”, 若是, 则证明是有效的 8 路测控数据, 否则证明 “9AAB” 或 “5D9E” 本身即为测控数据, 而非同步码。一旦为同步码, 则在校验完成后将其丢弃后存放在数据 FIFO 中, 然后同步解码出各通道数据分发给 8 路 D/A 转换器进行数据的 D/A 转换, 从而实现信号从发送至接收的同步正确传输过程。

2.6 D/A 转换电路设计

D/A 转换电路主要功能为将数字信号转换为模拟信号, 采用高精度 D/A 转换器来实现。该 D/A 转换器特性为: +10 V 内部高精度参考电压; 单极性/多极性; 满量程 D/A 转换的信号建立时间为 5 μs; ±5、±10 V 可配置信号输入量程; D/A 分辨率为 16 位; 复位可编程为最小值或中间值 2 类模式; 双缓冲数据输入模式以及菊花链级联工作模式; SPI 总线接口控制; 模拟电源为 15、-15 V, 数字电源为 +5 V; 工作温度为 -40~+85 °C。

D/A 转换器采用 SPI 总线与 FPGA 进行通信, 涉及的接口信号包括: CS 片选信号、SCLK 串行时钟信号、SDI 数据位输入信号、LDAC 启动转换信号、RSTSEL 复位值选择信号、RST 复位信号。在 RST 复位信号达到时, 根据 RSTSEL 信号的高低电平确定 D/A 转换器的初始值为最小值还是中间值。

采用 Verilog 硬件描述语言设计 D/A 转换器的硬件驱动程序。D/A 转换器的驱动时序如图 5 所示。

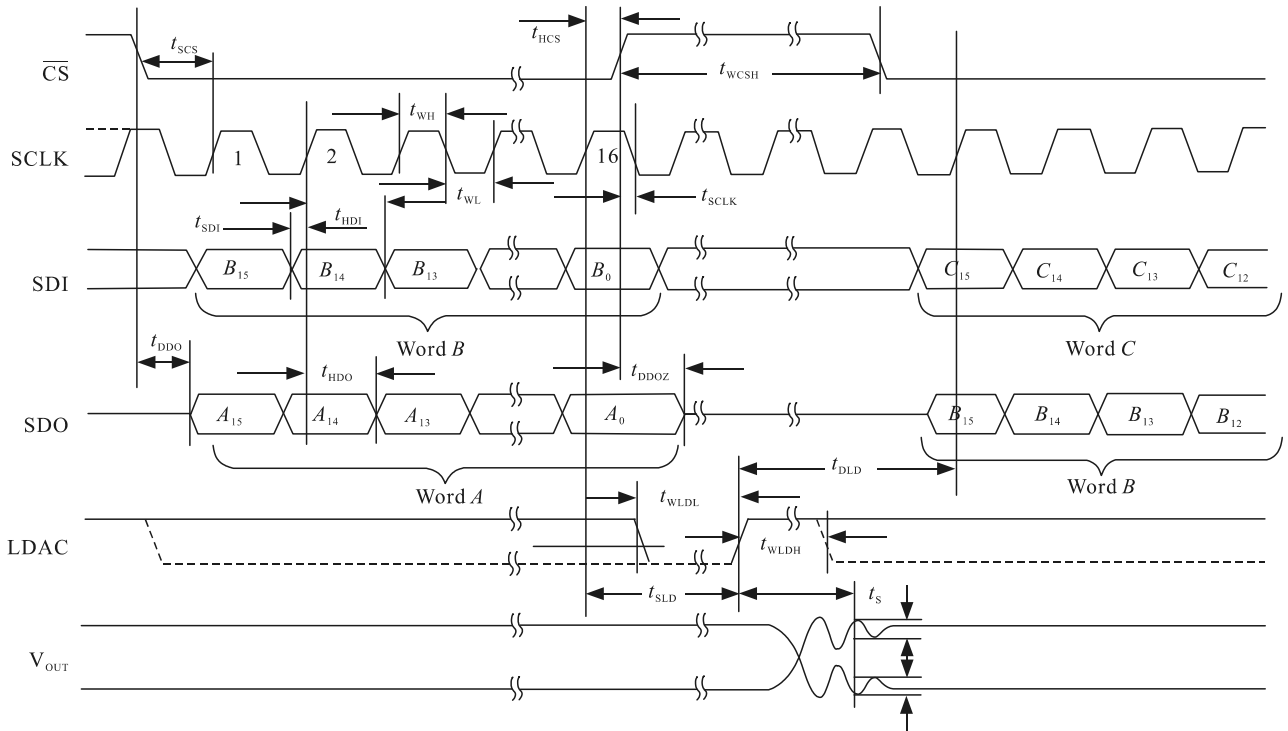


图 5 D/A 转换器驱动时序

设计时，主状态机的时钟采用系统外部接入的 50 MHz 系统时钟，状态变量设计为 DA_ST，驱动状态总数为 35 个。SCLK 在每个时钟沿和 CS 为低电平时产生一次跳变，为此 D/A 转换器的驱动主时钟为 25 MHz，状态 DA_S₀ 用于设置 D/A 转换器的复位操作，置 RST 为低电平，RSTSEL 为高电平，D/A 转换器输出为 0。DA_S₁~DA_S₃₂ 为按位串行加载 16 位的测试数据操作，DA_S₃₃ 执行 LDAC 的 D/A 转换指令，DA_S₃₃~DA_S₃₅ 执行延时调整至下一次转换的过渡状态。

2.7 时钟电路设计

时钟电路主要实现对 FPGA 的 RocketIO 高速串行传输 SerDes 提供 250 MHz 的源时钟，该时钟驱动 SerDes 按 2.5 Gbps 收发数据。时钟电路由无源晶振和锁相环器件组成，无源晶振输出 20 MHz 时钟信号到锁相环器件，锁相环通过内部的 LPF、VCO 等锁相单元实现 250 MHz 高精度时钟输出，时钟抖动小于等于 50 ps，适应于为 FPGA 的 RocketIO 的高速高精度串行时钟的使用需求。

2.8 低通滤波器设计

在模拟信号接收再现模块中，D/A 转换器将数字信号转换为模拟信号，转换后的模拟信号存在不连续的台阶和偶次谐波现象，在其后增加高性能的

二阶模拟低通滤波器，使复现后的模拟信号连续。采用运算放大器搭建有源低通滤波器，选用的运算放大器器件特征为：轨到轨放大器；工作电压±5~±18 V，满足 D/A 转换后信号的幅值；最大零漂失调电压为 75 μV；闭环增益为 120 dB；信号带宽为 10 MHz；温度失调电压为 0.6 μV/°C。

3 实验与分析

采用信号发生器、数字示波器对模拟信号远程复现装置的信号传输与复现情况进行测试。待传输的模拟信号由信号发生器产生，产生的信号幅值范围为 0.001~10 V，产生信号的频率为：100~2 000 Hz，信号的种类包括正弦波、三角波 2 类。信号发生器产生的模拟信号接入模拟信号发送模块，模拟信号发送模块通过光纤与远端的模拟信号接收再现模块相连。模拟信号接收再现模块的输出与数字示波器的输入相连，即采用数字示波器观察信号复现的效果。在该测试系统中，模拟信号发送模块实现 8 通道模拟信号同步采集，系统配置采样频率为 200 kHz/通道，模/数转换产生的群延时为 50 μs。数字信号通过 FPGA 内嵌的 RocketIO 高速接口加载至光纤模块，RocketIO 高速接口按 2.5 Gbps 发送数据，其延时相较于 50 μs 可忽略，光纤模块将信号通过光纤传输出去，光信号传输基

本无延时。模拟信号接收再现模块中 FPGA 内嵌的 RocketIO 高速接口按 2.5 Gbps 接收数据，其延时相较于 50 μ s 可忽略，接收的数字信号通过 D/A 转换器转换为模拟信号，D/A 转换的信号建立时间为 5 μ s，产生的延时为 5 μ s，因此整个系统产生的群延时为 60 μ s 左右。分别开展了 1 V/2 kHz、2 V/1 kHz、5 V/200 Hz、8 V/2 kHz、9.8 V/2 kHz、0.5 V/100 Hz、8.97 V/1 kHz、1.865 V/1 kHz、1 mV/1 kHz 等不同幅值、不同频率的信号远程复现实验，单次实测性能如表 1 所示，部分复现实测如图 6—8 所示。

表 1 信号远程复现性能单次测试

输入信号 幅值/V	输入信号 频率/Hz	远端复现 幅值/V	远端复现 频率/Hz	幅值误 差/%	频率误 差/%
1.0	2 000	1.010	2 002.435	1.00	0.12
2.0	1 000	2.005	998.444	0.25	-0.16
5.0	200	4.995	198.256	-0.10	-0.87
8.0	2 000	7.797	1 998.789	-2.53	-0.06
9.8	2 000	9.976	2 004.367	1.80	0.22
0.5	100	0.503	99.166	0.60	-0.83

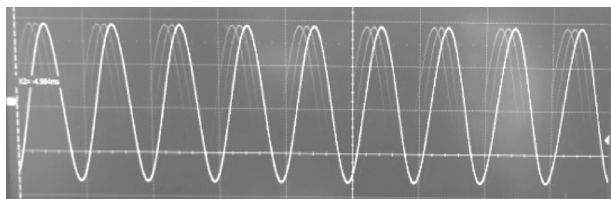


图 6 8.97 V/kHz 正弦波信号远程复现实测

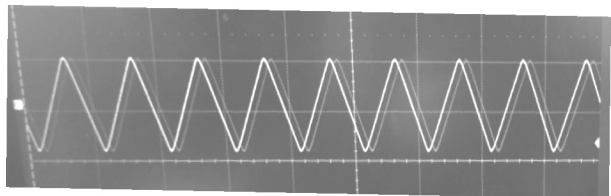


图 7 1.865 V/kHz 三角波信号远程复现实测

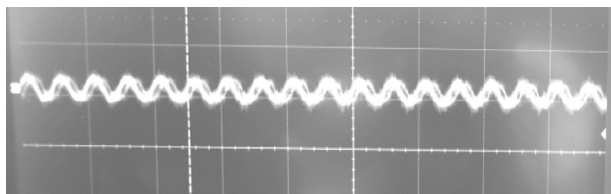


图 8 1 mV/kHz 正弦波信号远程复现实测

由实测数据可以看出：信号远程复现幅值误差在 $\pm 5\%$ 以内，频率误差在 $\pm 1\%$ 以内，满足分布式试验系统测控信号的传输与复现要求。

4 结束语

系统采用高精度 A/D 转换、高精度 D/A 转换、FPGA 内嵌的 RocketIO 高速接口驱动光纤模块，将信号通过光纤直接传输等技术，实现了幅值为 ± 10 V，频率为 DC~2 kHz、总通道数为 8 路的模拟信号同步远程传输与复现。信号远程复现幅值误差控制在 $\pm 5\%$ ，频率误差可控制在 $\pm 1\%$ ，全系统的群延时为 60 μ s 左右，可满足分布式试验系统测控信号的远程实时传输与复现要求。相较于 RS485 总线转光纤再转 RS485 总线的方式，或者基于以太网的远程传输方式等，具有传输数据量大、距离远、实时性高的特点。该装置直接实现模拟信号的传输，除传输振动模拟信号外，装置还可精确传输各类其他覆盖频带内的模拟信号。该装置适合于分布式测控模拟信号实时交互需求的场景，也适合于分布式远程监测实时性高的测试场合。

参考文献：

- [1] 贺鹏程, 杨高峰. 基于以太网的远程双通道信号采集传输装置[J]. 兵工自动化, 2020, 39(11): 36-38, 68.
- [2] 卓红艳, 袁欢, 刘忠. 基于 ADAM 模块的光纤远程测控系统解决方案[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 34-36, 41.
- [3] 胡道畅, 欧阳中辉, 陈青华, 等. 基于 CAN 总线的特种车辆状态数据采集系统[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 30-32, 68.
- [4] 张龙杰, 张浩, 浦跃兵, 等. 基于云平台的装备车辆状态监控系统[J]. 兵工自动化, 2021, 40(4): 1-4, 9.
- [5] 韩赵唤, 冯柯, 杨宜霖, 等. 某型军用桥梁装备通载状态监测系统[J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 1-4.
- [6] 陈航, 严帅, 刘胜, 等. 基于 RS485 总线的分布式高精度数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 71-74, 79.
- [7] 崔永俊, 张祥, 刘坤, 等. 分布式远程模拟量信号采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(2): 60-65.
- [8] 龚磊. 基于 FPGA 的高速光纤通信数据传输技术的研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [9] 徐立升, 张建春, 孙健. 基于 RocketIO 的高速光收发电路的设计实现[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 54-56.
- [10] 吴宾, 刘安良, 赵楠, 等. 基于 RocketIO 的高速光收发器的设计与实现[J]. 光通信技术, 2014, 38(11): 1-4.