

文章编号 1004-924X(2025)11-1793-10

高速 CMOS 图像数据的光纤传输系统

余 达^{1,2*}, 王昱淇^{1,3}, 刘金国^{1,2}, 司国良², 邵 帅², 陈欣然²,

杨秀策⁴, 周 瑜⁴, 周 欣¹, 郑 柯¹

(1. 智慧地球重点实验室, 北京 100094;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 101408;

4. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

摘要:为解决高速 CMOS 图像数据传输线缆多及链路损耗大等问题, 研制了高速 CMOS 图像数据的光纤传输系统。明确高速光纤传输的限制条件, 从光纤模块传输链路的损耗特性出发, 确定电信号链路为传输的关键环节。根据发送器全温度范围下的发送能力与接收器稳定工作的最小信号幅度, 得到电传输链路可容许的最大插损; 基于传输链路的插损模型, 确定受介电常数、介质损耗正切值制约的可靠传输距离。结合光纤模块高速信号的交流耦合需求和小封装镍电极材料电容在高可靠航天项目中的限用, 提出了大封装耦合电容和过孔引起链路阻抗失配的补偿方法。针对 GTX 模块中的 aurora64b66b 协议, 提出利用缓存 FIFO 的空标志信号恢复数据流中的行边界, 在 RS 编码(里德-所罗门编码器)与加扰间添加行头、行尾标识符及同步头等标志信息, 减少存储器资源消耗。仿真结果表明: 在 10 Gb/s 的传输速率下, 线路板的回波插损为 $-10.243\ 2\ \text{dB}$, 优于 OIF-CEI-04.0 和 PCIe4.0 协议标准要求, 信号传输质量良好; 插入损耗为 $-1.477\ 65\ \text{dB}$, 优于链路需求。通过测试, 连续 48 h 下的误码率为 5.789×10^{-16} , 系统稳定可靠。与旧协议相比, 新协议接口方法可节约 3.6% 的 FPGA 存储资源。

关键词: 高速 CMOS 图像数据; 光纤传输系统; 插损模型; 回波和插入插损; GTX 模块; aurora64b66b 协议

中图分类号: V248.1 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253311.1793

CSTR: 32169.14.OPE.20253311.1793

Fiber optic transmission system for high-speed CMOS image data

YU Da^{1,2*}, WANG Yuqi^{1,3}, LIU Jinguo^{1,2}, SI Guoliang², SHAO Shuai², CHEN Xinran²,

YANG Xiuce⁴, ZHOU Yu⁴, ZHOU Xin¹, ZHENG Ke¹

(1. Key Laboratory of Smart Earth, Beijing 100094, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

4. Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

* Corresponding author, E-mail: ciompyuda@163.com

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 智慧地球重点实验室开放基金资助项目 (No. KF2023YB02-01)

Abstract: To address challenges associated with multiple cables and significant link loss in high-speed CMOS image data transmission, a fiber-optic transmission system for high-speed CMOS image data was investigated. The limiting factors of high-speed fiber-optic transmission were identified, with particular emphasis on the transmission link within the fiber-optic module. The electrical signal link was determined as the critical element impacting overall transmission performance. Initially, based on the transmitter's full-temperature-range transmission capability and the receiver's minimum required signal amplitude for stable operation, the maximum permissible insertion loss for the electrical transmission link was established. Employing an insertion loss model for the transmission link, the reliable transmission distance was quantified, constrained primarily by the dielectric constant and dielectric loss tangent. Subsequently, considering the AC coupling requirements for high-speed signals in fiber-optic modules and the limitations imposed by the use of small-package nickel-electrode capacitors in high-reliability aerospace applications, compensation strategies were developed to mitigate impedance mismatches caused by large-package coupling capacitors and vias. Furthermore, for the Aurora 64b/66b protocol implemented in the GTX module, a method was proposed that utilizes the empty flag signal of the cache FIFO to restore line boundaries within the data stream, supplemented by the insertion of line head, line end identifiers, and synchronization headers between the Reed-Solomon encoder and the scrambler to reduce FPGA memory resource consumption. Simulation results at a 10 Gb/s transmission rate indicate an echo insertion loss of -10.243 dB on the circuit board, surpassing OIF-CEI-04.0 and PCIe 4.0 protocol standard requirements and confirming high signal transmission quality. The overall insertion loss of -1.477 dB also exceeds link specification demands. Software testing over 48 hours demonstrated a bit error rate of 5.789×10^{-16} , confirming the system's stability and reliability. Comparative analysis between the novel and conventional methods reveals that the proposed protocol interface reduces FPGA storage resource usage by 3.6%, highlighting its efficiency and practical significance.

Key words: high-speed CMOS image data; optical fiber transmission system; insertion loss model; echo and insertion loss; GTX module; aurora 64b/66b protocol

1 引 言

CMOS探测器广泛应用于航空航天领域^[1-2]。对于同步422接口应用,传输速率通常不超过10 Mb/s,可应用于低速的空间遥感仪器,如紫外遥感仪器^[3];对于LVDS接口传输,并行数据传输速率通常不超过100 MHz;对于2711传输,经过8B10B编码后输出的串行图像数据通常为2 Gb/s^[4-5]。目前,空间相机正向着大视场、宽覆盖、高分辨率的方向发展,遥感图像数据量呈几何级数增加,迫切需要新的传输技术。

光纤传输以高带宽、长距离、速度快和抗干扰的优点,得到了广泛应用^[6-7]。光纤通信技术首次大规模应用在国际空间站(ISS)上,是光通信技术从地面进入太空的一个重要里程碑^[8]。自1978年以来,无源光纤器件在航天领域的应用已

经经历40多年。1980年3月,美国空军发射光纤到宇宙空间进行为期六个月的辐射效应测试。1988年,美国航天局建议将光纤用于空间站的数据处理或控制,预期的数据处理与传输速率超过1.2 Gb/s。1992年,美国国家航空航天局(NASA)戈达德航天中心在小型探索者项目(SMEX)中证实了光纤器件可应用在航天器总线传输系统中。2021年4月29日,我国成功发射了“天和”核心舱,国产宇航光缆和光电子通信器件为航天员天地一体化音视频通信和高速数据传输提供了极大的带宽。

对于光纤数据,早期是通过2711接口芯片转换为高速串行数据后再通过光纤进行传输^[9-10]。目前,现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)已经集成了高速串行数据收发器,附带的集成误码率测试仪(In-

egrated Bit Error Ratio Tester, IBERT)可以直接对高速串行信号进行误码率测试,也可以通过调试信号摆幅、预加重和均衡,配合其他仪器来改善高速串行数据收发器(GTX)的通信质量。Xilinx公司的GTX吉比特收发器是一种典型的低功耗高速串行接口,可通过500 Mb/s~12.5 Gb/s的线速度进行数据传输^[11-12]。肖斯雨等面向宇航电子产品需求,优化印刷电路板(PCB)电源完整性与信号完整性设计,完成了4路单通道速率3.125 Gb/s的高速信号传输,误码率为 1×10^{-8} ^[13]。闫胜刚等实现了4路 $\times$ 3.125 Gb/s的高速信号传输,经过6 h的GTX监测,误码率低于 10^{-13} ^[14]。刘静军等采用Kintex-7 GTX与Virtex UltraScale+系列的GTY接口进行非板间接口测试,高速接口间通过1 m长的定制高速线缆连接,实现了单通道10 Gbit/s的通信速率,误码率为 2.6×10^{-13} ^[15],但此方案是基于FPGA之间的高速串口通信,无法应对光接收芯片不能进行发送信号幅度调整及均衡的状态,也无法应对传输距离达到几米甚至十几米的应用场景。

本文在硬件方面进行了高速传输链路的损耗分析,确定电信号链路为传输的关键环节。针对光纤模块高速信号的交流耦合需求和小封装镍电极材料电容在高可靠航天应用项目中的限制,进行了大封装耦合电容和过孔引起链路阻抗失配的补偿方法研究;提出通过选用低介电常数和损耗正切值的板材,同时优化布局缩短传输距离,弥补耦合电容的损耗;通过调整

传输信号与参考层的距离及参考面积,同时调整差分过孔参数,弥补传输链路上的阻抗失配。在软件方面,针对GTX模块中的aurora64b66b协议,提出利用缓存FIFO的空标志信号在RS编码与加扰间添加行头、行尾标识符及同步头等标志信息。综合验证结果表明,此数据帧的控制方法相对数据流的控制方法,需要对应具体的数据格式进行设置,但可节约存储器资源。

2 光纤传输系统组成

高速CMOS图像数据的光纤传输系统如图1所示。FPGA作为整个系统的核心,提供经驱动器进行电平变换后的驱动控制信号,并为探测器提供高频时钟,接收探测器返回的串行图像数据及伴随时钟,转换组合方式及起始位置均正确的并行数据。然后,按照aurora64B66B协议,经内部的GTX模块以10 Gb/s的数据率传输到光纤模块,转换为高速GTX光信号;也可接收外部输入的高速GTX光信号转换为电信号,再经GTX模块转换为低速高位宽的并行数据。

光纤模块是一款高性能气密封装4路并行光收发一体模块,其中心波长为850 nm,单电源3.3 V供电,功耗不超过1.5 W,单通道传输速率为1~10.312 5 Gb/s,高速信号引脚采用交流CML电平,具备I2C通信监控功能。该器件在10.312 5 Gb/s下的最大光纤传输距离为100 m,因此,光链路外的电子学链路是传输成功的关键

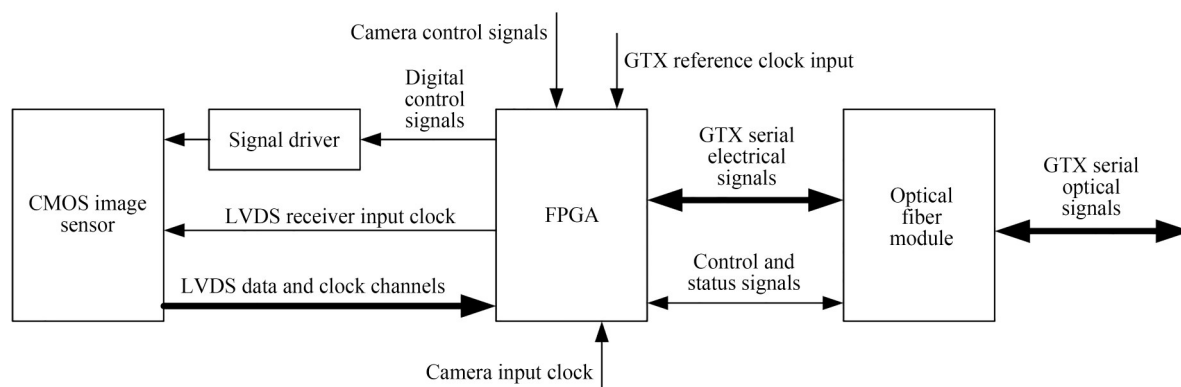


图1 高速CMOS图像数据的光纤传输系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical fiber transmission system for high-speed CMOS image data

部分。器件的抗总剂量能力不低于 100 krad(Si), 单粒子门锁阈值不低于 $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 位移损伤试验的总辐照剂量不小于 5×10^{11} (等效 1 MeV 中子)/ cm^2 。多数差分信号串联耦合电容, 主要是由于发送端发送的差分信号不是关于 0 电压轴对称, 直接连接会串扰进直流分量, 因此, 交流耦合电容进行隔直通交。光纤模块内没有集成耦合电容, 需要在模块外的差分高速信号接口加交流耦合电容。0402 封装超宽带电容的插入与反射损耗特性优良, 10 GHz 下的插损为 0.2 dB, 但由于镍电极电容在高可靠航天项目中限用, 这里只能选择插损为 1 dB 的 0603 封装电容。

3 光纤传输系统设计

3.1 高速电信号的传输链路模型

由于 FPGA 芯片管脚密度大, 而耦合电容与光纤模块均为表贴器件, 如图 2 所示, 将表贴封装的耦合电容放置在光纤模块端直接连接, 可减少链路上的过孔数量, 从而减少由过孔导致的阻抗失配。对高速传输链路的信号完整性研究, 就是通过分析链路中的高速信号, 研究当传输线金属导带与其上传输的代表信号的电压电流相互作用时, 金属导带与电压电流之间的电气特性对链路传输性能的影响^[16-18]。

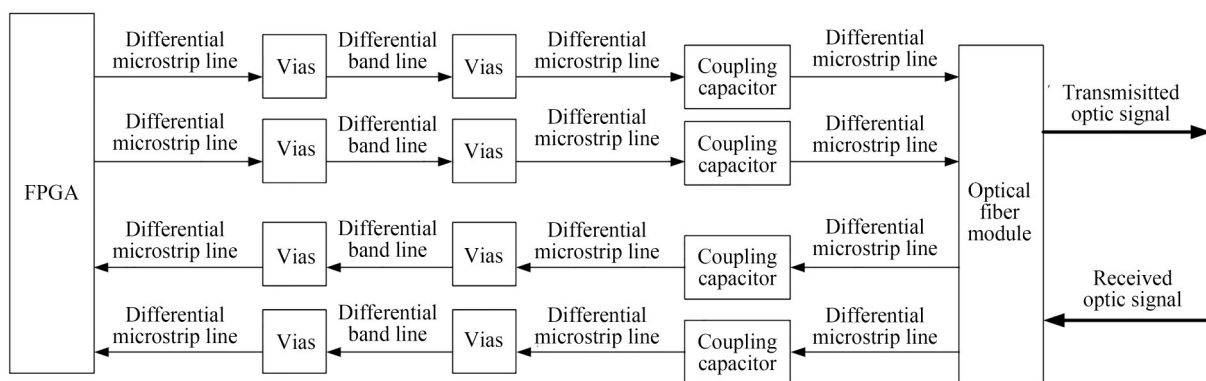


图 2 高速光电信号的传输链路模型

Fig. 2 Schematic diagram of transmission link model for high-speed optoelectronic signals

3.1.1 传输链路模型的插损模型

对于电子学传输链路的插损, FPGA 作为发送端时, 可调整输出信号的幅度, 也可进行预加重与后加重参数的设置来改善链路的传输特性; 而光纤模块输出的信号幅度不能实时调节, 也不能进行预加重与后加重参数的设置, 因此, 传输链路的损耗主要取决于传输链路长度、光纤模块输出信号幅度、FPGA 的 GTX 接收端正常工作的最小输入信号幅度及耦合电容的插损。建立的传输链路插损模型如下:

$$l_{\text{board}} * \left(\frac{31.6 \sqrt{f}}{(\omega + T) Z_0} + k \times f \times \sqrt{\epsilon_r} \times \tan \delta \right) < 10 \log \left(\frac{V_{\text{send_max}}}{V_{\text{receive_min}}} \right) - l_{\text{cap}}, \quad (1)$$

式中: f 为高速 GTX 图像数据的基频, 数据率的一半; ω 为线宽, T 为走线厚度, Z_0 为传输的特性阻抗; ϵ_r 为板材的介电常数, $\tan \delta$ 为板材的损耗

因子, k 为线路板损耗材的比例系数。通过使用低介电常数和损耗因子的板材, 优化成像控制器与光纤模块布局, 缩短走线, 从而减小传输过程的插入损耗。基于高速信号传输的幅度裕量管控策略, 通过统计发送端在全温度范围内可稳定发出信号的最大幅度 $V_{\text{send_max}}$ 、接收端在全温度范围内可稳定接收的最小幅度 $V_{\text{receive_min}}$ 、交流耦合电容在全温度范围的插损 l_{cap} , 从而确定链路的电子学传输距离 l_{board} 。

3.1.2 传输链路模型的阻抗模型

电子学传输链路的阻抗特性主要取决于光纤模块、耦合电容、FPGA 的管脚及过孔端的阻抗控制。为减小链路反射的影响, 传输链路上的单端信号和差分信号阻抗管控与光纤模块内的管控值要相同。高速 GTX 图像数据在传输链路上存在两个阻抗变化的环节, 即大尺寸的耦合电容及器件焊盘, 和信号换层的过孔, 如图 3 所示。

根据差分微带线的阻抗公式(2),大尺寸焊盘相对表层微带线的尺寸增加,可通过增加与邻近参考平面的距离进行阻抗补偿。

$$Z_{\text{diff}} = 2 * \frac{87}{\sqrt{E_r + 1.41}} \times \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right) \times (1 - 0.48 \exp(-0.96D/H)), \quad (2)$$

其中: Z_{diff} 为未耦合时的单端微带线特性阻抗, E_r 为PCB板材的介电常数, H 为传输线到参考平面之间的介质厚度, W 为传输线线宽, T 为传输线的铜皮厚度, D 为传输线的间距。

首先,根据微带线的宽度 w_1 与耦合电容焊盘的宽度 w_2 ,通过去除大尺寸焊盘参考层的铜皮来调节与等效参考层的高度。大尺寸焊盘参考层被去除的层数满足如下约束:

$$\left(\sum h_i + \sum \Delta h_{i-1} \right) \leq \frac{(0.8w_2 + T)}{(0.8w_1 + \Delta h_1)} \times h_1 < (\sum h_{i+1} + \sum \Delta h_i). \quad (3)$$

然后根据确定的挖空层数,复核大电容焊盘处理后的差分阻抗,得到:

$$Z_{\text{pad}} = \frac{2 \times 87}{\sqrt{E_r + 1.41}} \times \ln \left(\frac{5.98(\sum h_i + \sum \Delta h_{i-1})}{0.8w_2 + T} \right) \times (1 - 0.48 \times e^{-\frac{0.96D}{(\sum h_i + \sum \Delta h_{i-1})}}), \quad (4)$$

其中: $\sum h_i + \sum \Delta h_{i-1}$ 表示焊盘参考层被去除 $i-1$ 层后与最近参考层下表面(包括了参考层厚度)的距离, h_1 表示瓷片电容的表层与第一层焊盘参考层的距离, h_i 表示第 $i-1$ 层焊盘参考层与

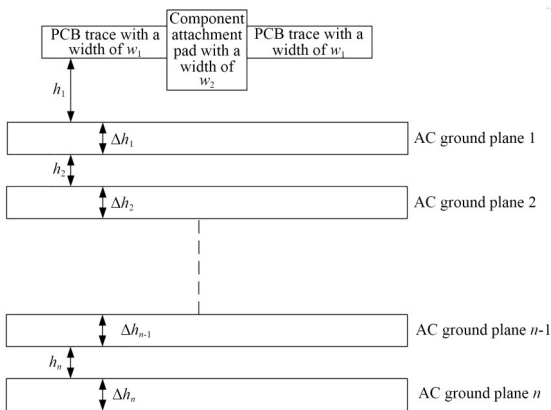


图3 大尺寸焊盘对应的线路板叠层

Fig. 3 Schematic diagram of PCB stack-up for large pad connections

第 i 层焊盘参考层之间的距离, h_{i+1} 表示第 i 层焊盘参考层与第 $i+1$ 层焊盘参考层之间的距离, Δh_i 表示第 i 层焊盘参考层自身的厚度; Δh_{i-1} 表示第 $i-1$ 层焊盘参考层自身的厚度, h_i 表示第 $i-1$ 层焊盘参考层与第 i 层焊盘参考层之间的距离, T 表示走线厚度。

差分过孔如图4所示,通过调节两过孔的中心距 s 、过孔半径 r 、反焊盘的直径 d 参数,使差分过孔的特性阻抗与光纤模块管控的阻抗相同^[17]。差分过孔的阻抗公式如下:

$$Z_{\text{via}} = \frac{2 \times 60}{\sqrt{E_r}} \times \ln \left(\frac{2d \times \tanh \left(\frac{\pi s}{2(s+d)} \right)}{\pi r} \right). \quad (5)$$

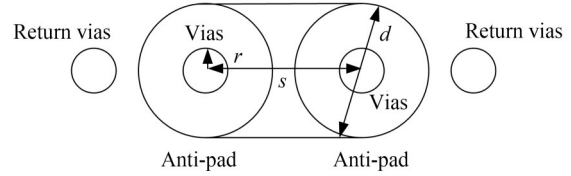


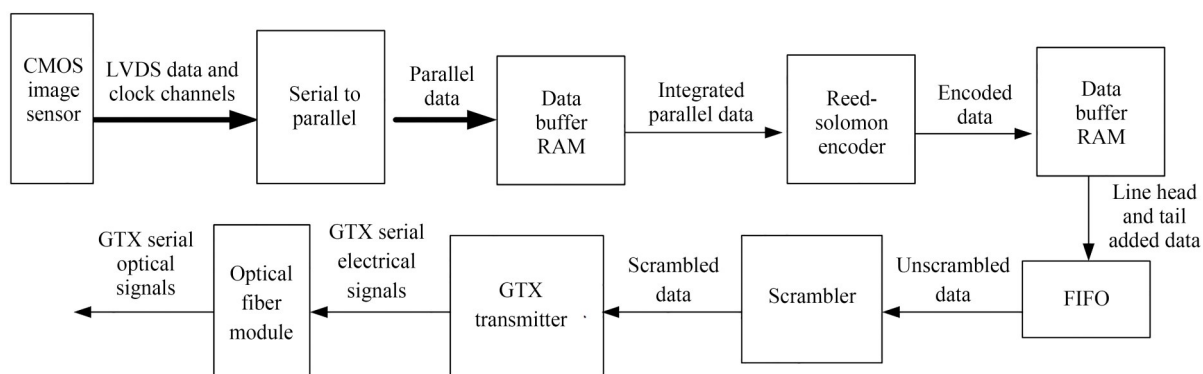
图4 差分过孔示意图

Fig. 4 Layout of differential via placement

3.2 Aurora64b66b 协议接口设计

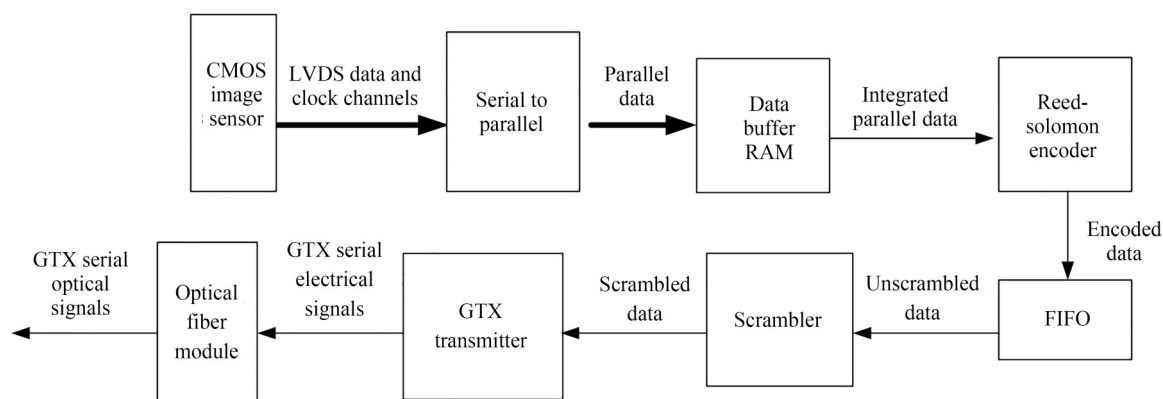
如图5所示,探测器输出的各通道高速串行图像数据,经串并转换模块后输出像素时钟频率的并行数据,并行写入乒乓结构的多通道数据缓存存储器中。在并行写操作结束时,开始从多通道的数据缓存存储器中分时逐个通道读出图像数据,送入里德-所罗门编码器,输出编码后的数据。编码后的数据经64b66b间隔调整器转换为满足aurora64b66b协议的数据,即33个循环周期中32个有效,1个无效;然后经加扰器进行直流电平均衡后送入GTX发送器,输出高速串行差分数据;最后再经光纤模块,输出被调制的激光信号。

对于输出的一行图像数据,需要在首个有效数据前添加行头标识符,代表一行有效数据的开始;在最后一个有效数据后添加行尾标识符,代表一行有效数据的结束。由于行头与行尾标识符不参与RS编码过程,因此仅能在RS编码后加扰前阶段进行添加;另外,经过RS编码后,一行完整的数据被拆分为多段,导致原来的行边界信息丢失。基于数据流的处理方法如图5(a)所示,额外添加一个乒乓结构的添加行头与行尾的数



(a) 基于数据流的处理流程

(a) Processing workflow based on data flow



(b) 基于数据帧的处理流程

(b) Processing flow based on data frames

图 5 高速图像数据的传输流程

Fig. 5 Flowchart of transmission process for high-speed image data

据缓存器,把行头和行尾标识符固化在数据缓存器的首尾位置,RS编码后的数据在有效阶段即写入数据缓存器,首地址在行头标识符之后,然后递增,直到到达行尾标识符前1个的位置,再跳转回行头标识符之后。添加行头与行尾的数据缓存器的写操作在RS编码后的数据有效阶段进行,在写操作地址达到行尾标识符前1个的位置时启动读操作,并将读出的数据写入64b66b间隔调整器。而64b66b间隔调整器的读操作是通过查询自身的空标志信号与aurora64b66b协议的数据有效信号来启动的,当且仅当FIFO内数据有效信号为高电平时,启动读操作。

本文提出的基于数据帧的处理方法如图5(b)所示,相对基于数据流的处理方法,可减少一个乒乓结构的添加行头与行尾标识符的数据缓存器。64b66b间隔调整器的作用是实现不同消

隐比例关系的RS编码间歇数据与aurora64b66b协议数据间的缓存,特别是通过调整一行中多段RS编码数据的持续时间与一行中有效的aurora64b66b协议数据持续时间接近,则FIFO占用的存储器资源可压缩到最低。FIFO的写使能为里德-所罗门编码器输出有效信号,而FIFO的读操作是通过检测FIFO的空状态标志信号的下降沿来启动的。通过被下降沿清零开始递增的计数器进行数据的读出和行头与行尾标识符的添加,被下降沿清零的计数位置作为读出行的起点,重新建立读出行的起始位置与结束位置。由于读出行的起点位置与循环周期为33的计数信号计数值之间是异步非确定关系,存在33种可能的状态。通过统计一行数据起始点与循环计数值的33种可能状态,整理出4种行头与行尾标识符与有效数据的组合状态:(1)行头标识符与有效

数据不在同一组连续 32 个周期的有效区间;(2)行头标识符与有效数据在同一个有效区间;(3)行尾标识符与有效数据不在同一个有效区间;(4)行尾标识符与有效数据在同一个有效区间。根据 4 种状态设置对应的行头标识符、行尾标识符、读使能的上升沿、读使能的下降沿位置^[19]。

4 仿真与测试结果

4.1 传输链路优化前后的对比仿真

选用板材在 10 Gb/s 下的介电常数为 3.5,损

耗正切值为 0.004 6。设计优化结果如图 6 所示,8 条曲线代表线路板上 8 个(4 收 4 发)传输通道。在 10 Gb/s 的传输速率下,优化前线路板的回波损耗为 $-4.832\ 8\ \text{dB}$,插入损耗为 $-2.210\ 00\ \text{dB}$;经优化后的回波损耗为 $-10.243\ 2\ \text{dB}$,优于 OIF-CEI-04.0 协议标准和 PCIe4.0 标准要求的 $-8\ \text{dB}$ ^[20];插入损耗为 $-1.477\ 65\ \text{dB}$,优于受光纤模块全温度范围输出幅度 380 mV、FPGA 稳定工作的最小信号幅度 250 mV 及耦合电容插损 1 dB 三者共同所决定的 $-2.64\ \text{dB}$,信号传输质量良好。

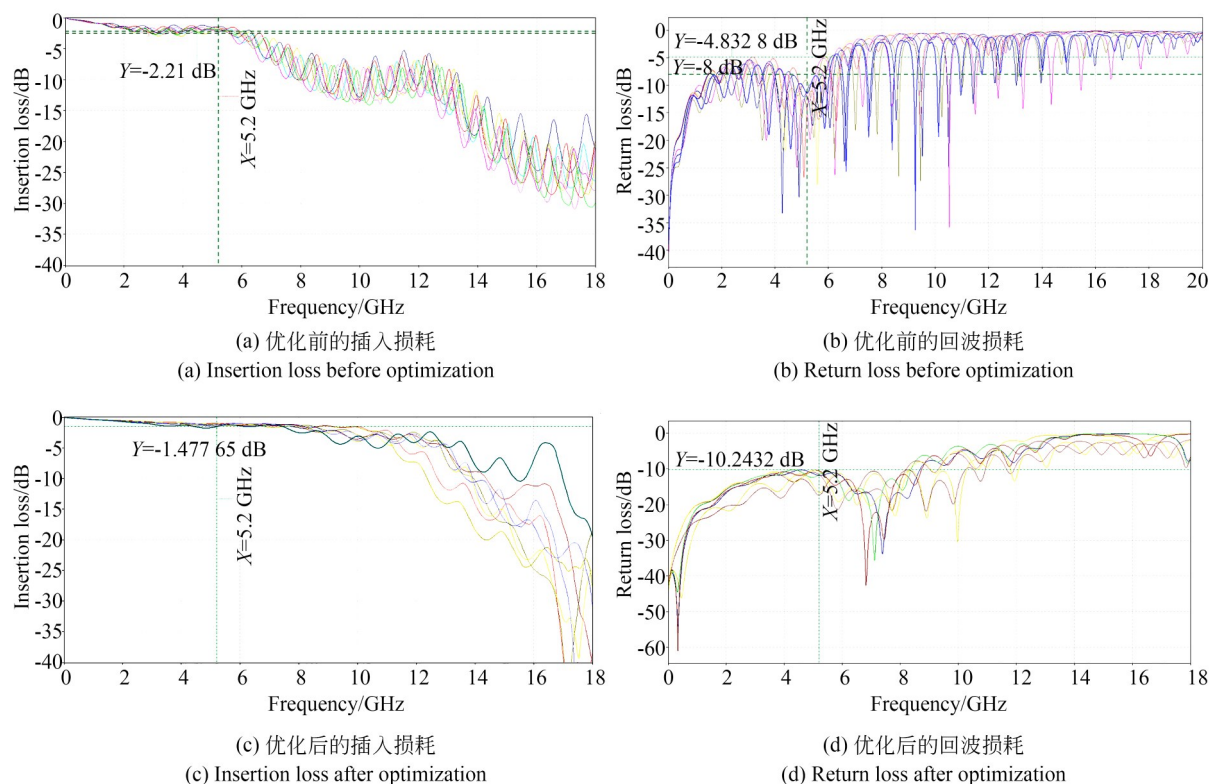


图 6 线路板的插入损耗和回波损耗仿真结果

Fig. 6 Simulation of insertion loss and return loss for circuit board

4.2 不同工作时间下的误码率测试

如图 7 所示,采用 2 m 长的光纤,在光纤末端将发送端与接收端连接在一起,等效光纤长度为 4 m,进行眼图测试,结果如图 8 所示。在整个误码率测试过程中,均未出现误码。在极低误码率的高可靠性场合,IBERT 软件是采用置信度模型来估算误码率的。当长时间未检测到误码时,通过式(6)统计误码率的 BER。

$$BER = \frac{-\ln(1 - SLC)}{N}, \quad (6)$$

其中:SLC 为置信系数, N 为总传输比特数。采用该模型的好处是避免直接测试天文数字级比特数,提升测试效率。测试连续工作 1 h 的误码率为 2.324×10^{-14} ,连续 48 h 下的误码率为 5.789×10^{-16} ,误码率随连续工作时间而缓慢下降。

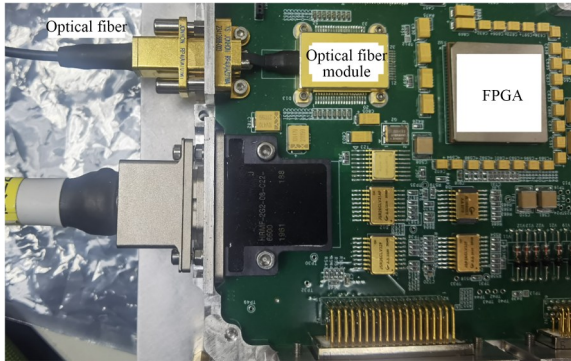
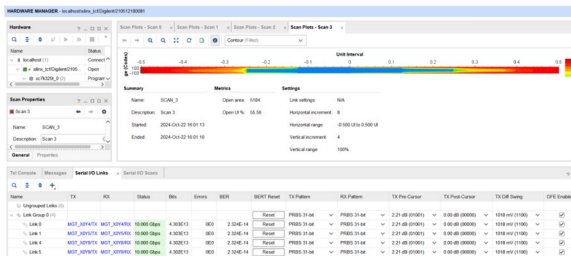


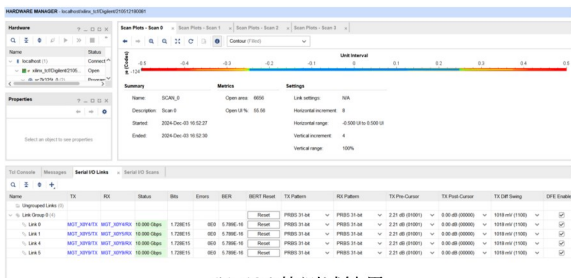
图7 高速CMOS图像数据的光纤传输系统局部

Fig. 7 Partial photograph of high-speed CMOS image data transmission system using optical fibers



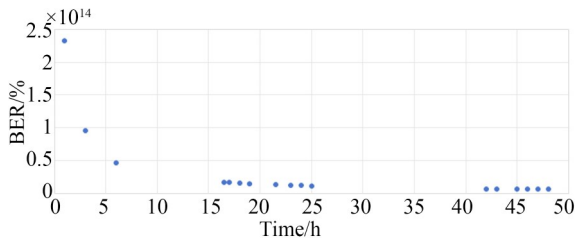
(a) 1 h的测试结果

(a) Test results for 1 h



(b) 48 h的测试结果

(b) Test results for 48 h



(c) 误码率随时间变化的统计

(c) Statistic of bit error rate variation over time

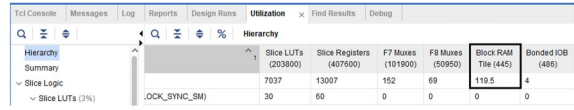
图8 误码率测试结果

Fig. 8 Test result of bit error rate

4.3 Aurora64b66b 协议接口方法对比

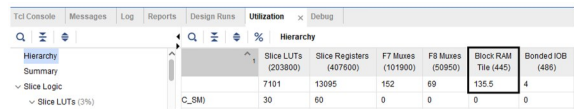
如图9所示,在剔除其他不相关IP的资源占用后,基于数据帧方法占用的块RAM资源为

119.5个,而基于数据流方法占用的块RAM资源为135.5个,可节约3.6%的FPGA存储资源。



(a) 基于数据帧方法占用的块RAM资源

(a) Block RAM resources utilized by the data frame-based method



(b) 基于数据流方法占用的块RAM资源

(b) Block RAM resources utilized by the data stream-based method

图9 两种方法的资源占用率对比

Fig. 9 Comparison of resource utilization for two methods

5 结 论

本文针对高速CMOS图像传感器的海量数据传输需求,设计了基于光纤模块的单通道传输速率为10Gb/s的多通道传输系统。在硬件设计上,采用光纤模块将10 Gb/s高速电信号链路转换为低损光信号链路,根据光纤模块的手册数据,传输距离可从1 m扩展到100 m;由于现有相关技术水平下小封装低损耗镍基电容的电极厚度不满足高可靠航天应用需求,使用大封装大插损的电容建立了光纤传输链路的信号模型,提出优化布局缩减传输链路过孔数量,通过增加信号参考平面距离来抵消焊盘尺寸大于走线尺寸的阻抗突变,仿真得到的链路回波损耗从-4.824 0 dB 缩减到-10.243 2 dB,提升了高速信号采样的宽度;基于建立的插损模型,提出优化布局缩短高速电信号传输距离、选用低介电常数和损耗因子的板材、将信号耦合方式从紧耦合调整为松耦合,从-2.210 0 dB 缩减到-1.477 65 dB,保证高速电信号传输过程中足够的幅度裕量。在软件设计上,针对GTX模块中的aurora64b66b协议要求每发送32个有效数据需要发送1个无效数据,行头与行尾标识符号需要在RS编码后添加,提出利用FIFO的空标志信号恢复RS编码过程丢失的行边界,采用每行传输起始位置进行周期33循环计数器计数值状态统计,从而确定行头

与行尾标识符号位置的设计,相比传统方法减少了一级存储器缓存资源。

作者贡献说明:

余达:成像系统设计;

王昱淇:论文撰写;

刘金国、司国良:实验数据分析;

邵帅、陈欣然:实验测试;

杨秀策、周瑜、周欣、郑柯:研究调研及需求分析。

参考文献:

- [1] 黄敬涛,王晓东,孙振亚,等. 天问一号高分相机火表复杂照度下自动调光成像电路设计[J]. 光学精密工程, 2022, 30(2): 191-198.
HUANG J T, WANG X D, SUN ZH Y, *et al.* Design of auto-exposure imaging circuit under complex illuminance of Mars in Tianwen-1 high-resolution camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(2): 191-198. (in Chinese)
- [2] 李云辉,王晓东,刘文光,等. 天问一号高分相机 CMOS 曝光参数设计与卷帘校正[J]. 光学精密工程, 2022, 30(2): 143-152.
LI Y H, WANG X D, LIU W G, *et al.* CMOS exposure parameter design and rolling shutter distortion correction for Tianwen-1 high-resolution camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(2): 143-152. (in Chinese)
- [3] 张恒,马庆军,王淑荣. 紫外遥感仪器高速 CMOS 成像电子学系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 471-479.
ZHANG H, MA Q J, WANG SH R. High speed CMOS imaging electronics system for ultraviolet remote sensing instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 471-479. (in Chinese)
- [4] 夏巧桥,胡正文,张青林. 遥感相机快视高速可靠传输系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 971-979.
XIA Q Q, HU ZH W, ZHANG Q L. Design and implementation of high speed and reliable transmission platform in fast view system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 971-979. (in Chinese)
- [5] 宁永慧,刘辉,赵庆磊,等. 大面阵高帧频 CMOS 成像电子学系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1167-1177.
NING Y H, LIU H, ZHAO Q L, *et al.* High-frame frequency imaging system of large area CMOS image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1167-1177. (in Chinese)
- [6] 邱琪,宋玉娥,阳树宗. 空间站信息系统与光纤通信技术[J]. 电子科技大学学报, 2000, 29(4): 365-368.
QIU Q, SONG Y E, YANG SH Z. Fiber optical communication and information systems in space stations [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2000, 29(4): 365-368. (in Chinese)
- [7] 胡鹏博,刘兴超,阮建斌,等. 一种基于 Aurora 协议光纤的 FPGA 远程更新方法[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(6): 1-6.
HU P B, LIU X CH, RUAN J B, *et al.* A remote update method of FPGA based on optical fiber [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2023, 21(6): 1-6. (in Chinese)
- [8] 郑伟,殷杰,田庄,等. 国际空间站宇航光纤通信器件发展综述[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 51-59.
ZHENG W, YIN J, TIAN ZH, *et al.* Development of optical fiber communication devices for the international space station [J]. *Optical Communication Technology*, 2024, 48(1): 51-59. (in Chinese)
- [9] 张达,徐抒岩. 高速 CCD 图像数据光纤传输系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 669-675.
ZHANG D, XU SH Y. High-speed CCD image data fiber transmission system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 669-675. (in Chinese)
- [10] 李进,吕增明,陶宏江,等. 适于高速 CCD 图像数据光纤传输的纠错技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2548-2558.
LI J, LÜ Z M, TAO H J, *et al.* Error correction technology for CCD image using high speed optical fiber transmission [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2548-2558. (in Chinese)
- [11] 陈龙,缪泽宇,解维坤,等. 一种 FPGA 的高速 IP 验证方法研究与实现[J]. 电子质量, 2023(7): 78-83.
CHEN L, MIAO Z Y, XIE W K, *et al.* Research and implementation of a high speed IP authentication method for FPGA [J]. *Electronics Quality*, 2023(7): 78-83. (in Chinese)
- [12] 王凯. 万兆以太网光纤通信在 FPGA 上的可靠实

- 现[J]. 电子制作, 2024, 32(19): 108-112.
- WANG K. Reliable implementation of 10 Gigabit Ethernet optical fiber communication on FPGA [J]. *Practical Electronics*, 2024, 32(19): 108-112. (in Chinese)
- [13] 肖斯雨, 杨凯, 王冠雄, 等. 基于 GTX 接口的宇航用高速串口设计与应用[J]. 航天标准化, 2022(1): 32-35.
- XIAO S Y, YANG K, WANG G X, *et al.* Design and application of aerospace product based on gigabit transceiver [J]. *Aerospace Standardization*, 2022(1): 32-35. (in Chinese)
- [14] 闫胜刚, 江伟伟. 基于 FPGA 的高速串行 IO 研究[J]. 雷达与对抗, 2021, 41(3): 33-36.
- YAN SH G, JIANG W W. Research on high-speed serial IO based on FPGA [J]. *Radar & ECM*, 2021, 41(3): 33-36. (in Chinese)
- [15] 刘静军, 贺小军, 王鹏, 等. K7-GTX 与 VU9P-GTY 高速数据远距离通信应用[J]. 仪表技术与传感器, 2024(6): 41-44.
- LIU J J, HE X J, WANG P, *et al.* K7-GTX and VU9P-GTY high-speed data long-distance communication applications[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(6): 41-44. (in Chinese)
- [16] 彭理. 基于高速背板无源链路的信号完整性研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
- PENG L. *Research and Design of Signal Integrity Based on High-speed Backplane Passive Link*[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [17] 陈杨杨. 基于 LVDS 的高速串行互连结构信号完整性研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- CHEN Y Y. *Research on Signal Integrity of High Speed Serial Interconnect Structure Based on LVDS*[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [18] 余达, 薛栋林, 李国宁, 等. 高速光纤图像数据传输设计方法: CN118803211A[P]. 2024-10-18.
- YU D, XUE D, LI G, *et al.* Design method for high-speed fiber optic image data transmission: CN118803211A[P]. 2024-10-18. (in Chinese)
- [19] 余达, 王昱淇, 司国良, 等. 高速图像数据的光纤传输系统: CN119135934A[P]. 2024-12-13.
- YU D, WANG Y, SI G, *et al.* Optical fiber transmission system for high-speed image data CN119135934A[P]. 2024-12-13. (in Chinese)
- [20] 楼向雄, 高羽, 张廷锴, 等. HBA 卡的 PCIe4.0 信号完整性设计与实现[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 1-7.
- LOU X X, GAO Y, ZHANG T K, *et al.* Design and implementation of PCIe4.0 signal integrity of HBA card [J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences)*, 2023, 43(2): 1-7. (in Chinese)

作者简介:



余 达(1980—),男,四川内江人,博士,研究员,2007 年于吉林大学获得学士学位,2012 年于中国科学院长春光机所获得博士学位,主要从事空间光学遥感成像及电子学系统设计等方面的研究。E-mail: ci-ompyuda@163.com