

文章编号:1007-2780(2017)10-0815-07

## 多路基于 TLK2711 高速串行图像数据的传输系统

余 达\*, 刘金国, 徐 东, 孔德柱, 陈佳豫, 梅 贵, 周 磊

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为提高多路高速串行图像数据传输在航天应用中的 FPGA IO 利用率,同时克服接收到的多路并行恢复数据相对相位不确定性问题,采用时钟分路器同时为多路 TLK2711 和 FPGA 提供低抖动时钟。对于串行数据发送,采用 FPGA 内部的数字时钟管理单元(DCM)对发送数据的相位进行调整,并采用 TLK2711 的内部环回功能进行发送数据和时钟相位的动态自适应调整。对于串行数据接收,采用高速异步数据缓存将多路相对相位不确定的数据调理为参考相同时钟,最终转换为满足 Camera Link 接口协议的图像数据。实验结果表明,采用时钟分路器可大大降低时钟抖动,该传输系统工作稳定可靠,最大传输速率可达 6.8 Gbit/s。此方法可大大提高 FPGA 内部的资源利用率,实现多路并行恢复数据的相对确定相位,满足多通道基于 TLK2711 的高速串行数据的高稳定传输要求。

**关 键 词:**高速串行图像数据; IO 利用率;低抖动时钟;动态自适应调整;相位不确定

**中图分类号:**TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173210.0815

## Design of multi channel high-speed serial image data transmission system based on TLK2711

YU Da\*, LIU Jing-guo, XU Dong, KONG De-zhu, CHEN Jia-yu, MEI Gui, ZHOU Lei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to improve the utilization rate of FPGA IO for multi-channel high-speed serial image data transmission in the space application, and to overcome the relative phase uncertainty of the received multi-channel parallel recovery data, we propose a new design of multi-channel high-speed serial image data transmission system based on TLK2711. One new method is using the clock buffer simultaneously to provide low jitter clock for the multi-channel TLK2711 and FPGA. For serial data transmission, the FPGA internal component digital clock management unit (DCM) is used to adjust the phase, the TLK2711 internal loopback function are carried out for the data and clock phase of the dynamic adaptive adjustment. For serial data reception, high-speed asynchronous data cache is used

收稿日期:2017-03-11;修订日期:2017-06-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61405191);吉林省科技发展计划项目(No. 20160101273JC, No. 20150520102JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61405191); Jilin Province Science and Technology Development Plan Item in China(No. 20160101273JC, No. 20150520102JH)

\* 通信联系人, E-mail: ciompyuda@163.com

for data conditioning and meets the Camera Link interface protocol ultimately. The output data have the same reference clock, though the input data have uncertain phase relationship. The experimental results show that the clock buffer can reduce clock jitter, the transmission system is stable and reliable, the maximum transmission rate is up to 6.8 Gbit/s. This method can greatly improve the resource utilization rate within the FPGA and realize the relative stable phase of the multi-channel parallel recovery data to meet the high stability transmission requirements of the multi-channel TLK2711 based on high-speed serial data.

**Key words:** high speed serial image data; IO utilization; low jitter clock; dynamic adaptive adjustment; phase uncertainty

## 1 引言

空间光学遥感在对地观测、天文探索、碎片观测等领域发挥着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。随着遥感技术的不断进步,国内外遥感卫星核心载荷的体积不断减小,空间和光谱分辨率不断提升,星上图像数据量呈几何级数增长,相应地对星上数据传输系统的工作速率提出了更高要求<sup>[3-4]</sup>。为保证星上图像数据的高可靠性,数据传输系统需要具有传输速率高,传输通道多、误码率低等特点。基于串化/解串(SERDES)的高速串行技术,将时钟和数据合并一起进行传输,采用差分信号传输和时钟数据恢复两项技术突破了传统并行 I/O 技术的数据传输瓶颈,增强了抗噪声、抗干扰能力,解决了限制数据传输速率的信号时钟偏移问题,且小型化了数据传输系统的尺寸,降低了整个系统的功耗。但高速串行传输芯片如 TLK2711 对时钟抖动要求很高,要求时钟稳定度小于  $\pm 1 \times$

$10^{-5}$ ,抖动值优于 40 ps(峰峰值)<sup>[5-10]</sup>。对于数据和发送端,要么使用 FPGA 内专用的时钟通道资源 MRCC 和 SECC 来传输时钟,要么使用 FPGA 内部的全局时钟资源来传输时钟且同 bank 内减少高速信号数量以降低 SSO(simultaneously switching output)的干扰,FPGA 的 IO 资源利用率低,且对电源的供电要求很高。对于数据接收,由于恢复的伴随时钟有多种可能的初始相位,TLK2711 在接收的数据进行串并转换过程中,每次上电后解码输出图像数据参考时钟的相对相位不确定<sup>[11]</sup>,若采用单一时钟对解码的多组数据进行采样,则存在亚稳态风险,因此需要对解码后的多路图像数据进行异步缓存。

## 2 多路高速串行图像数据的传输系统

如图 1 所示,多路高速串行图像数据的传输系统由多路高速串行数据发送端和多路高速串行

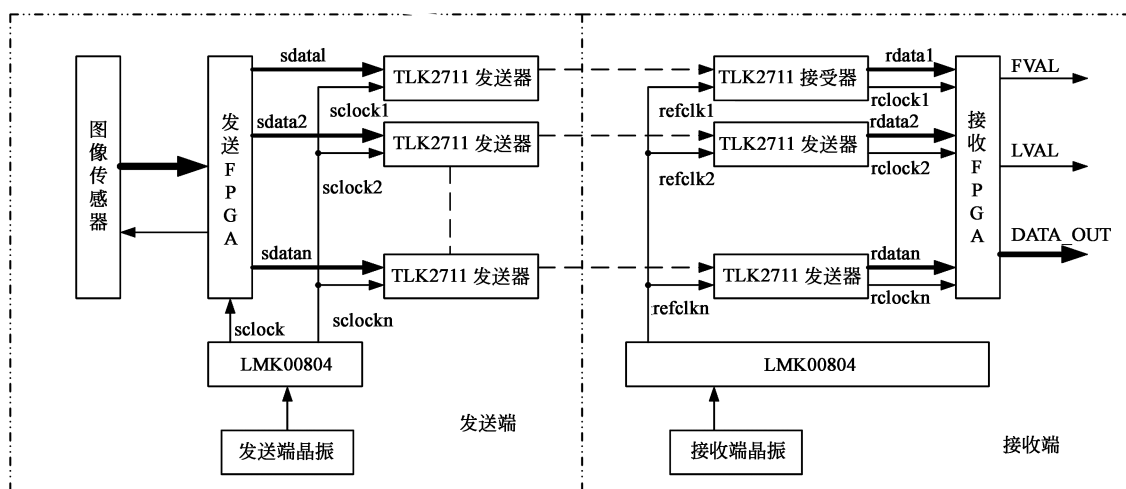


图 1 多路高速串行图像数据的传输系统系统框图

Fig.1 Block diagram of multi-channel high-speed serial image data transmission system

数据接收端两部分组成。发送 FPGA 控制图像传感器工作,将图像传感器输出的图像数据转换为多通道图像数据采用多通道 TLK2711 发送器进行传输。发送端晶振产生的 100MHz 时钟经时钟分路器 LMK00804 输出。

LMK00804 输出的多路低抖动时钟(sclock、sclock1、sclock2...sclockn)分别送入发送 FPGA 和多通道 TLK2711 发送器,分别作为其工作时钟。时钟分路器 LMK00804 输出的时钟经发送 FPGA 内部的数字时钟管理单元(DCM)进行延迟后,作为发送 FPGA 的系统时钟,产生与 TLK2711 输入时钟同步的多路图像数据(sdata1、sdata2...sdatan)分别送入多个高速串行发送器。

与发送端类似,接收端晶振输出的时钟经 LMK00804 输出多路低抖动时钟,分别作为多通道 TLK2711 接收器的参考时钟。多通道 TLK2711 接收器接收发送端产生的高速串行图像数据,产生并行图像数据(rdata1、rdata2...rdatan)和伴随时钟(rclock1、rclock2...rclockn)送入

接收 FPGA 内。接收 FPGA 以第一路的伴随时钟 rclock1 作为系统时钟,将输入的图像数据进行调理,最终输出满足 Camera Link 接口协议的图像数据。

## 2.1 串行数据芯片 TLK2711 工作原理

TLK2711 接口的工作原理如图 2 所示。图中,TKLSB 和 TKMSB 为 K 码发生器的发送控制信号,分别通过电平的高低表示发送数据的低 8 bit 和高 8 bit 是数据还是 K 码,通常两者配合使用;RKLSB 和 RKMSB 为 K 码指示标识,这两个信号是接收状态信号,分别通过电平的高低表示低 8 bit 和高 8 bit 接收到的是数据还是 K 码;TXCLK 为发送端外部参考输入时钟,对于串行图像数据接收则是接收端的外部参考时钟;RXCLK 为接收端恢复的时钟信号。从图 2 可以看出,TLK2711 发送接口包括编码器、串行器、发送器,接收接口包括解码器、解串器、接收器。在发送端,TLK2711 将输入的 16 bit 并行有效数据分成两个字节,并与控制码 TKLSB 和 TKMSB 同时送入两个 8 bit/10 bit 编码器进行编码,每个

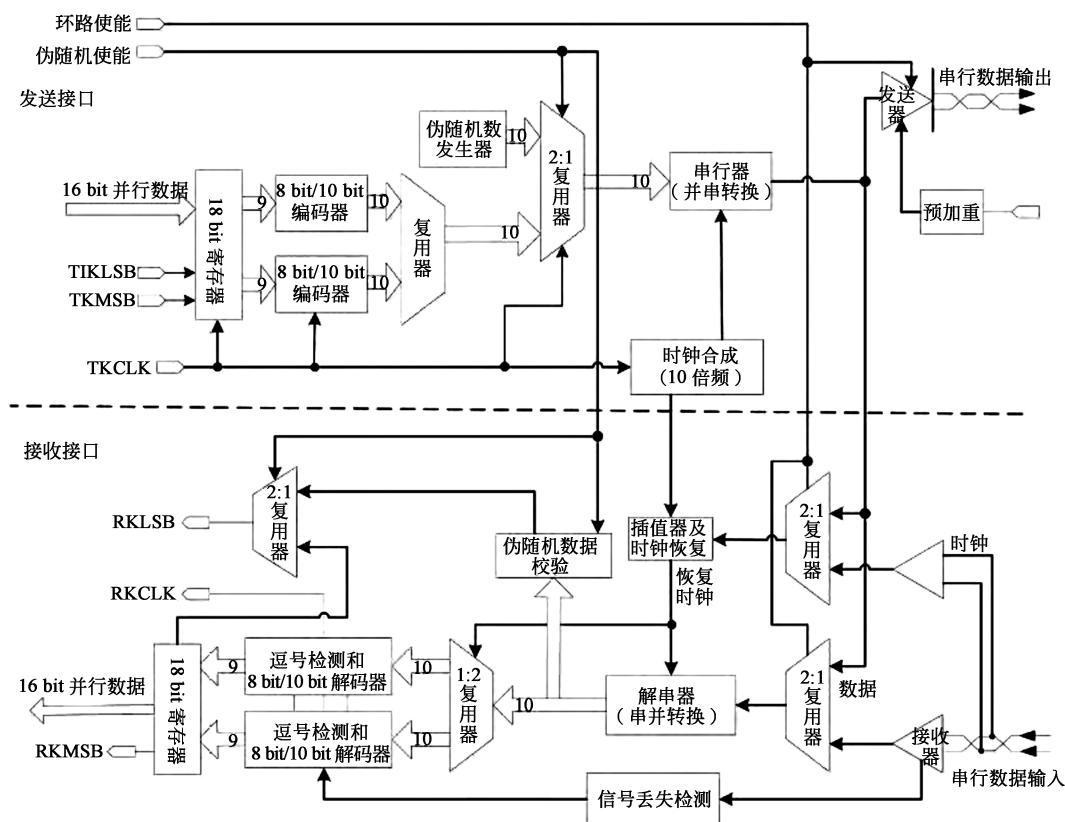


图 2 TLK2711 工作原理图

Fig.2 Fundamental diagram of TLK2711

编码器产生的 10 bit 有效数据经多路复用器送入串行器,完成并行数据到串行数据的转换,最后通过带有预加重功能的发送器输出串行差分数据信号。在接收端,TLK2711 接收到经 8 bit/10 bit 编码后的串行差分数据,基于本地的外部参考时钟,通过对输入数据采样恢复并行数据的伴随时钟,通过恢复的伴随时钟对输入数据流进行同步,将串行数据经解串器完成串行数据到并行数据的转换,再通过两个独立的逗号检测(Comma Detect)和 8 bit/10 bit 解码器,完成数据解码和字节排列对齐,最后输出 16bit 并行有效数据。TLK2711 发送接口和接收接口可独立使用,也可同时使用,还可使用芯片内部的环回功能进行自发自收<sup>[12-14]</sup>。

## 2.2 时钟分路器 LMK00804

如图 3 所示,LMK00804 是一款低偏斜高性能的时钟分路器,可从差分或单端时钟中选择一路作为输入时钟,输出四路电平可为 3.3 V、2.5 V、1.8 V 或 1.5 V 的单端时钟信号。其优越的低附加抖动 0.04 ps RMS(typ)@125 MHz 和相位噪声,通道间的最大相位偏差为 35 ps,最大的器件延迟为 700 ps,最大工作频率为 350 MHz,可满足高性能和高重复性的应用需求。

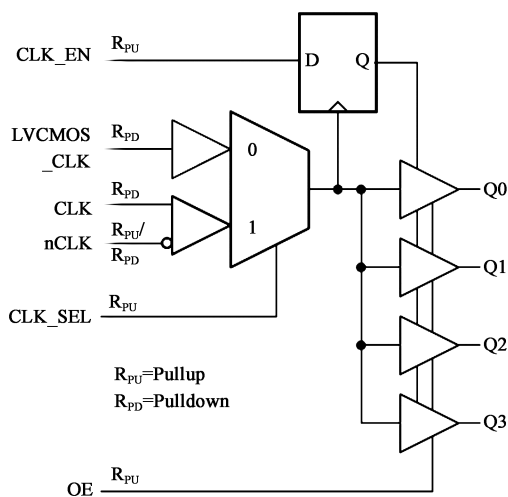


图 3 LMK00804 内部结构图

Fig.3 Internal structure of LMK00804

## 3 多路高速串行图像数据的传输系统的软件设计

### 3.1 数据发送软件设计

如图 4 所示,发送 FPGA 的工作流程是:上

电首先进入发送上电初始化状态机,然后进入发送图像数据和时钟最佳相位的检测状态机,最佳相位检测到后进入持续 2 ms 的同步码发送状态机,最后进入发送以帧为单位的图像数据状态机。

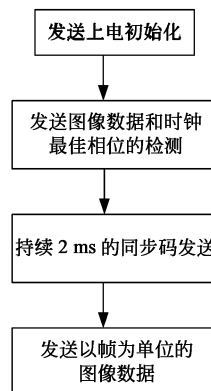


图 4 发送控制器的工作流程图

Fig.4 Work flow of the sending controller

并行图像数据和伴随时钟的相对最佳相位通过高速串行发送器内部的环回功能进行训练获得。具体的训练方法是采用控制器内部的数字时钟管理单元(DCM)对控制器送入高速串行传输芯片的数据进行相位调整;通过寻找两个采集到错误训练数据的极限相位值位置  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$ ,则可二者的中间位置  $\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$  即为最佳位置。

### 3.2 数据接收软件设计

数据接收 FPGA 的工作流程是:上电首先进入接收上电初始化状态机,然后进入帧头检测状态机,当检测到帧头后进入检测行头状态机,当检测到行头后进入以行为单位接收数据状态机,当一行数据接收完毕后进入一帧数据接收完毕判断状态机,当一帧数据未接收完毕则进入检测行头状态机,当一帧数据接收完毕后进入检测帧头状

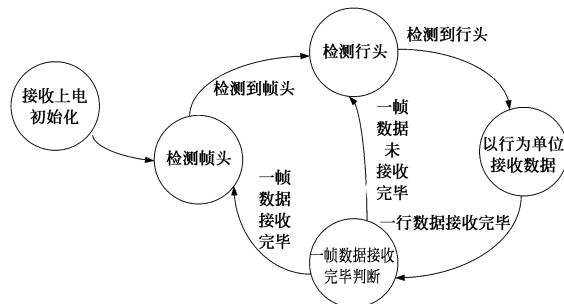


图 5 接收控制器的工作流程图

Fig.5 Work flow of the receiving controller

态机。

由于 TLK2711 对接收的数据进行串并转换过程中,每次上电后解码输出图像数据参考时钟的相对相位不确定,因此需要对解码后的多路图像数据进行异步缓存,把相对参考时钟相位不同的各路数据转换为同一参考时钟的图像数据。具体工作流程如图 6 所示,以第一通道 TLK2711 的恢复时钟 rclock1 为系统时钟,第一通道的图像数据经同步 FIFO 进行缓存,其余通道的图像数据采用异步 FIFO 进行图像数据缓存,以第一通道的 FIFO 读使能信号作为其余异步 FIFO 的读使能信号,以第一通道新产生的帧有效和行有效信号作为其余通道图像数据的帧有效和行有效信号。

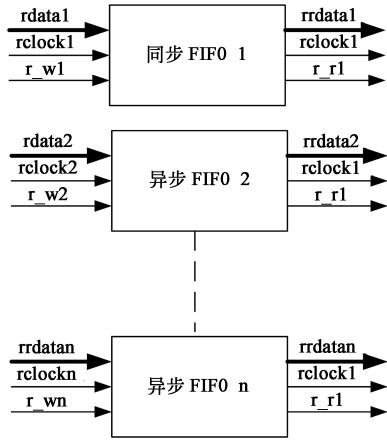


图 6 接收图像数据缓存框图

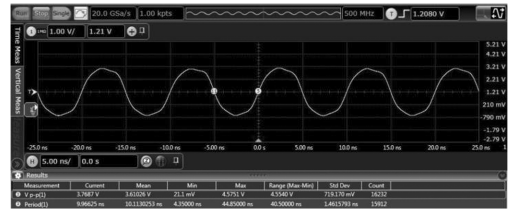
Fig.6 Block diagram of receive image data buffer

对于输入的图像数据,当其消隐期最够长,即  $\frac{p_{\text{有效}} + p_{\text{消隐}}}{f_{\text{TLK2711}}} > \frac{p_{\text{有效}} + 1}{85}$ , 则输入的  $n$  通道图像数据可采用  $n$  tap Camera Link 数据格式进行传输; 当其消隐期过短, 即  $\frac{p_{\text{有效}} + p_{\text{消隐}}}{f_{\text{TLK2711}}} < \frac{p_{\text{有效}} + 1}{85}$ , 则输入的  $n$  通道图像数据可采用  $2n$  tap Camera Link 数据格式进行传输。式中  $p_{\text{有效}}$  为每行的有效图像数据数,  $p_{\text{消隐}}$  为每行的无效图像数据数。

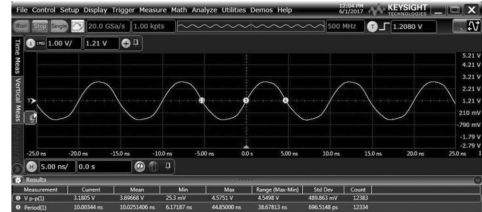
## 4 实验与结果

如图 7 所示,采用相同的时钟源,经由

FPGA IO 输出的时钟周期标准差为 1461.5793ps;采用时钟分路器 LMK00804 输出的时钟周期标准差为 695.5148 ps,抖动明显减小。如图 8 和 9 所示,采用两路 TLK2711 进行长光辰芯公司的 CMOS 图像传感器 GSENSE400 图像数据的传输,TLK2711 的工作时钟频率为 100 MHz,每行有效图像数据长度为 1 030 个数据,将两路 100 MHz 12 bit 的图像数据转换为 4 tap 50 MHz 12 bit 的 Camera Link medium 图像数据,采集到的图像稳定,辅助数据正确,连续工作 20 h 无错码。



(a)经 FPGA 的 IO 产生的时钟  
(a)Clock generated via the FPGA IO



(b)采用时钟分路器产生的时钟  
(b)Clock generated via the clock buffer

图 7 两种时钟产生方式对比

Fig.7 Comparison of two clock generation method

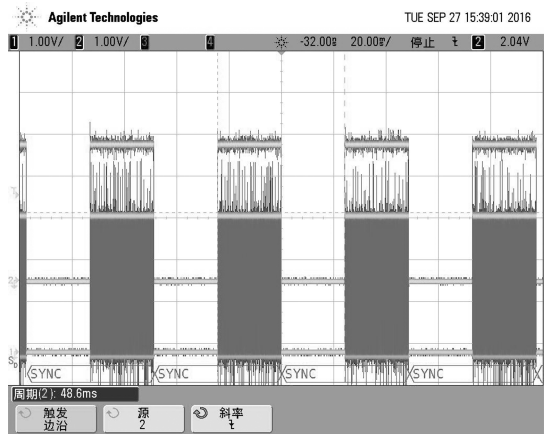


图 8 从 TLK2711 解码输出的帧有效和行有效信号  
Fig.8 FVAL and LVAL signals decoded from TLK2711

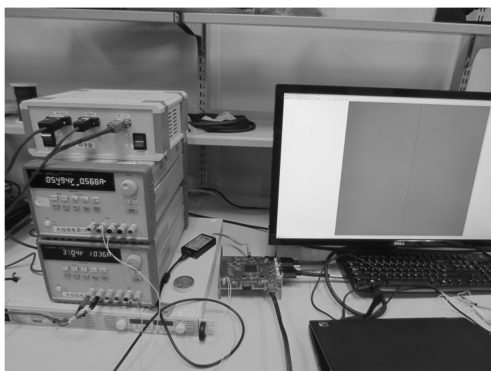


图 9 双路 TLK2711 图像数据传输验证系统

Fig.9 Verification system of Dual TLK2711 image data transmission

## 5 结 论

本文针对航天应用对多路高速串行图像传输

的时钟低抖动高可靠性要求,提出了时钟分路、发送数据相位的动态自适应调整 and 高速异步数据缓存的方法,并介绍了基于 TLK2711 的多路高速图像数据传输系统的结构和工作原理。然后研究了发送数据和时钟相位的动态自适应调整和多路相对相位不确定的数据调理。最后,对两种时钟产生方法进行了对比测试,采用双路 TLK2711 进行了传输验证实验。实验结果证明:采用时钟分路器方法可大大降低时钟抖动,该传输系统工作稳定可靠,以 2 Gbit/s 串行数据速率(并行数据时钟 100 MHz)连续工作 20 h 无错码,最大传输速率可达 6.8 Gbit/s。此方法可大大提高 FPGA 内部的资源利用率,实现多路并行恢复数据的相对确定相位,满足多通道基于 TLK2711 的高速串行数据的高稳定传输要求。

## 参 考 文 献:

- [1] 张学军,樊延超,鲍赫,等.超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J].光学精密工程,2016,24(11):2613-2626.  
ZHANG X J, FAN Y C, BAO H, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2613-2626. (in Chinese)
- [2] 黄建余,谭继波,吴文堂,等.GEO 碎片天基观测图像速度估计与动态规划检测[J].光学精密工程,2017,25(2):537-546.  
HUANG J Y, TAN J B, WU W T, et al. Velocity estimation of GEO debris space-based observation image and dynamic programming detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 537-546. (in Chinese)
- [3] 王洋,贺强民,肖龙.一种星上海量实时图像数据高速传输设计[J].空间电子技术,2016,13(6):73-79.  
WANG Y, HE Q M, XIAO L. Design of high-speed transmission for mass and real-time image data in satellite [J]. *Space Electronic Technology*, 2016, 13(6): 73-79. (in Chinese)
- [4] 贾建超,陈涛,李钊.基于 TLK2711 的高速数据串行传输[J].电子技术应用,2013,39(9):47-49,53.  
JIA J C, CHEN T, LI Z. High-speed serial transmission for data based on TLK2711 [J]. *Application of Electronic Technique*, 2013, 39(9): 47-49, 53. (in Chinese)
- [5] 张媚,杜辉,关晖,等.基于 TLK2711 的遥感卫星高速串行载荷数据接口设计[J].航天器工程,2015,24(6):13-19.  
ZHANG M, DU H, GUAN H, et al. Design of satellite high-speed serial data interface based on TLK2711 [J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(6): 13-19. (in Chinese)
- [6] 周宇昌,李小军,周诠.空间高速数据传输技术新进展[J].空间电子技术,2009,6(3):43-48.  
ZHOU Y C, LI X J, ZHOU Q. Recent progress in space high rate data transmission technology [J]. *Space Electronic Technology*, 2009, 6(3): 43-48. (in Chinese)
- [7] 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 S Y. High-speed CCD image data fiber transmission system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 669-675. (in Chinese)
- [8] TLK2711-SP 1.6-Gbps to 2.5-Gbps class V transceiver [DB]. Texas: Texas Instruments Incorporated, 2012.
- [9] Texas Instruments Incorporated. Using the TLK2711-SP with minimal protocol [DB]. Texas, 2011.
- [10] 肖龙,万旻,李涛.高速数字图像数据传输的研究及实现[J].航天返回与遥感,2009,30(2):50-55,69.  
XIAO L, WAN M, LI T. Research and implementation of a high-speed digital image data transmission [J].

- Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 50-55, 69. (in Chinese)
- [11] 李成. 大型物理实验装置高精度时间同步技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.  
LI C. *The research on the timing synchronization technology with high precision for large scale physics experiments* [D]. Hefei: University of Sciences and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [12] 张达, 李巍. 高集成度多光谱 TDI CCD 焦平面系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1018006.  
ZHANG D, LI W. Highly integrated multi-spectral TDI CCD focal plane system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018006. (in Chinese)
- [13] 路朋罗, 李永昌, 金龙旭, 等. 高空间分辨率大视场遥感相机图像的高速高可靠传输系统研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(7): 1364-1373.  
LU P L, LI Y C, JIN L X, *et al.* A high-speed and high-reliability transmission system for the high resolution and large field TDICCD camera [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(7): 1364-1373. (in Chinese)
- [14] 濮建福, 赖晓敏, 田文波, 等. 高速串行传输系统信号幅值衰减研究[J]. 上海航天, 2016, 33(2): 82-86.  
PU J F, LAI X M, TIAN W B, *et al.* Study on signal amplitude attenuation for high-speed serial transmission system [J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(2): 82-86. (in Chinese)

**作者简介:**余达(1980—),男,四川内江人,博士,副研究员,2012 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感及立体测绘成像方面的研究。E-mail:ciompyuda@163.com