

文章编号 1004-924X(2009)03-0669-07

高速 CCD 图像数据光纤传输系统

张 达^{1,2}, 徐抒岩¹

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

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种多路高速 CCD 图像数据光纤并行传输系统,并应用于空间遥感相机中。设计并实现了单路有效数据率最高可达 1.28 Gb/s 的光纤传输通道。阐述了系统设计思想,光纤传输通道结构,并对其中的关键技术-高速总线接口、高速串行光电接口等进行了详细分析。实际完成了 5 通道 TDICCD 图像数据光纤并行传输系统,总有效数据率高达 5.7 Gb/s。实验证明该系统工作稳定可靠,实时传输效果好,无误码,满足了高速多通道 CCD 图像数据的速率和距离传输要求。

关键词: 光纤传输; 数据传输; 图像数据; 电荷耦合器件

中图分类号: TN919.8 **文献标识码:** A

High-speed CCD image data fiber transmission system

ZHANG Da^{1,2}, XU Shu-yan¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;* 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To improve the data output quality of multi-channel, high data rate and high transmission distance CCD system in a remote sensing camera, a kind of parallel fiber transmission system adaptive to multi-channel high-speed CCD image data is developed to apply to the space remote sensing camera. The fiber transmission channel with effective data rate of single port up to 1.28 Gb/s is designed and realized. Based on describing the thought of design and the structure of fiber transmission channel, the key technologies among the system, such as high-speed data interface and high-speed serial photo-electric interface are analyzed in detail. A TDICCD image data parallel transmission system with five channels based on fiber is developed, total effective data rate is up to 5.7 Gb/s. The experimental results indicate that the system works stable, high effective, and no error code, which can meet the requirements of high-speed and far distance in the transmission of multi-channel CCD image data.

Key words: optical fiber transmission; data transmission; image data; CCD

1 引言

随着基于 CCD 成像技术的遥感相机在视场和分辨率指标要求上的不断提高,所采用的 CCD 输出路数,拼接片数和单端口读出速率也不断增多和提高,从而使数字化后的 CCD 图像数据量急剧增加,传输通道带宽大幅度提高。为保证 CCD 信号质量,CCD 信号数字化及预处理部分往往处于焦平面附近,遥感相机为减小成像部分的负荷,通常将数据处理单元设计得距离焦平面较远,这就需要远距离地进行 CCD 图像数据的传输。这方面的工作以往多采用并行通道传输,以适当降低单通道带宽进行处理,国外在这方面做了大量研究。例如,美国 Aerospace Corp. Sensor System Subdivision 的试验型多通道读出信号采集系统^[1],底特律 Wayne State University 应美国 Air Force Office of Scientific Research/NA 要求研制的 640 pixel×512 pixel 14 bit 24 通道凝视焦平面成像系统^[2]均采用多通道采集技术,获得了较好的性能,但这些设计系统体积过于庞大。而且随着各种性能指标要求的进一步提高,这种方式会进一步导致系统整体互联复杂程度的加剧和重量的增加,不适于遥感相机轻小化的需求。

光纤是传输光信号的一种绝缘介质,分单模和多模两种,其中单模的带宽潜力使其成为高速和长距离数据传输的唯一选择。光纤是理想的传输线,具有传输频带宽、损耗小、中继距离长、体积小、重量轻等优点。传统的模拟视频光纤传输技术已经比较成熟,但仍然存在缺点,诸如信号失真严重、传输质量低、系统性能不稳定、多路视频信号同传时易产生镜像、交调干扰等^[3-4],而数字视频光纤传输技术则可以很好地解决以上问题,大大提高信号的传输质量,增强系统稳定性。随着数字光纤通信技术的进步,其应用领域越来越广泛。目前的国际空间站计划中大量地使用了光纤数据传输系统,其具有超强的抗辐射和抗电磁干扰能力^[5]。

本文在参考国内外相关技术的基础上,根据背景项目需求,结合国内研究条件,首次将单模光纤通信技术应用于国内空间遥感相机的高速数据传输过程中,提出了高速 CCD 图像数据光纤传输

系统。与同轴传输相比,单模光纤的衰减大约比同轴电缆小 3 个数量级^[6-7],同时光纤之间不存在信号间的串扰问题。

2 系统设计思想

2.1 总体设计框架

系统需要实现 5 片含有全色和彩色 CCD 总共 55 通道输出,10 位量化后所产生的高达 550 位并行图像数据的高速处理及远距离传输,每片 CCD 所产生的有效数据率高达 1.14 Gb/s。

根据需要的功能,如果完全并行处理,其所消耗的 I/O 资源是非常巨大的;而完全转换成串行处理,将极大提高对处理器速度和传输带宽的要求,也是不现实的,因此不可能采用完全串行处理的。

考虑上述技术特点和难点,此系统中采用了并串相结合的方式,这样既降低了对单一处理器处理性能和 I/O 能力的要求,也适当减小了对单路传输带宽的需求。并行在这里指的是为充分利用 CCD 的多路输出特点,减少读取数据的时间,实现全视场实时处理,采取基于区域并行的方法,即对于 55 通道 5 片 CCD 来说,分 5 个视频处理控制单元。每个单元中的控制处理器负责预处理 1 片 CCD 共 11 通道的图像数据,5 个处理器对应处理 5 片 CCD 信号。串行在这里是指为了充分利用处理器的处理能力和光纤传输通道的带宽,同时受单处理器 I/O 资源的限制,每片 CCD 的全色和彩色图像数据在处理器内部需要进行两次时分复用,完成 11 通道 10 位并行数据的整合并单路输出,以实现每路最低有效数据率高达 1.14 Gb/s 的高速光纤数据传输,这样就大大降低了系统互联的复杂程度。系统的总体结构如图 1 所示。

由图 1 可知,系统中 CCD 信号预处理部分,也就是视频处理单元与后续的载荷数据处理单元仅仅通过 5 条光纤就完成了互联关系。系统中 5 片 CCD 输出的模拟视频信号通过近焦平面电子学接口与后续的视频处理单元相连。视频处理单元集成了专用视频处理器、处理控制器、高速串化器及光纤接口等功能单元电路,用以实现视频信号的模数转换,全色和彩色 CCD 数据整合、数据重组打包、高速并串转换以及光发送等功能。光

纤作为高速数据的传输通道,按照光纤通信标准,将具有一定格式的数据包传输到后续的数据处理

单元,最终实现科学数据的压缩、打包、存储以及射频传输等功能。

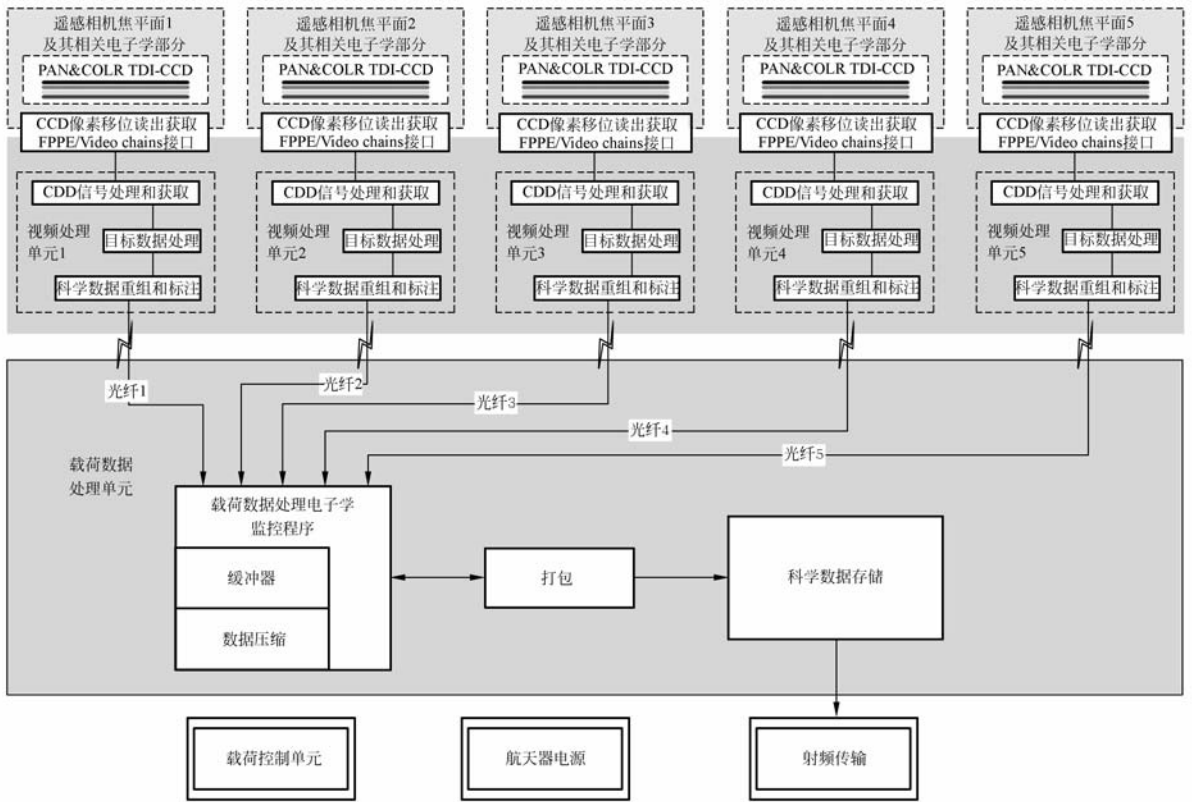


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of system

2.2 光纤传输通道

本系统中,由于所采用的 5 片 CCD 是相同

的,所以对应的 5 路数据光纤传输通道结构也是一致的。具体到每路而言,其结构如图 2 所示。

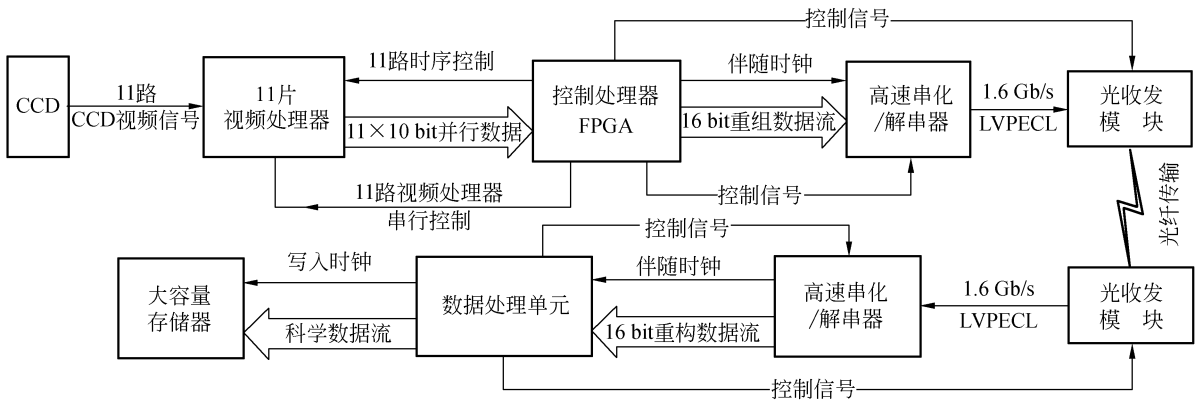


图 2 光纤传输通道功能结构框图

Fig. 2 Block diagram of fiber transmission channel function

在数据传输通道中,由于此处的控制处理器主要实现的是数字逻辑功能,同时单片就需要较

强的 I/O 能力,处理控制器选用了内嵌 PowerPC 的 Vertex II Pro 系列高性能 FPGA,型号为

XC2VP40,其内部功能划分如图 3 所示。

8 通道全色和 3 通道彩色并行数据流在 FPGA 内部通过基于时分复用原理的 1 级数据重组过程形成各自单一通道的带有行同步(线阵)、数据时钟和图像数据的数据流,完成数据的无缝缓冲与整合。整合后的两通道数据流以及相关状态附加信息通过高速总线接口(HSBI)逻辑经 2 级数据重组打包成具有一定格式的 16 位高速数据

流。出于简化 FPGA 内部时序逻辑以及可靠性方面的考虑,进行光纤传输所必需的高速串行功能由外置独立芯片 TLK2711 加以实现,而不采用 FPGA 内部的 RocketIO。高速串化解串器将输入的高速 16 位数据流转成 G 级以上的串行信号,以 LVPECL 接口电平形式输出至光收发模块,最终通过光纤将图像数据远距离传输给后续数据处理单元进行相关处理。

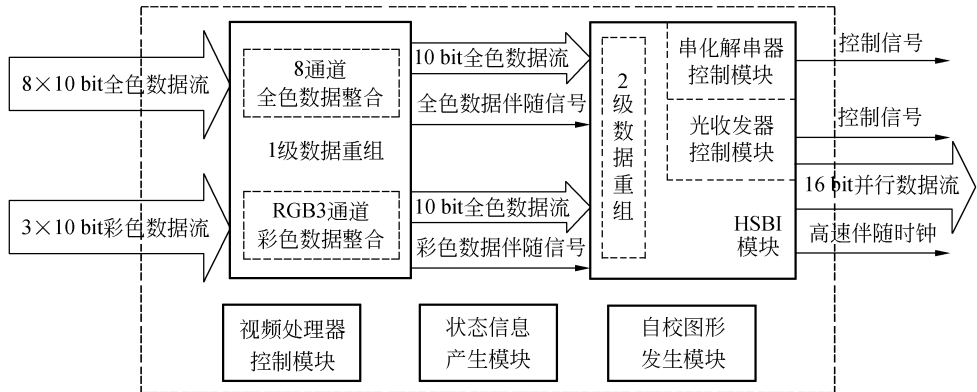


图 3 控制处理器 FPGA 内部功能框图

Fig. 3 Internal function diagram of control processor FPGA

3 关键技术

3.1 高速总线接口

利用光纤通信技术进行高速光纤数据传输,发送端进行电/光转换的是高速串行差分信号,接收端进行光/电转换出的也是高速串行差分信号,这就涉及到高速数据流的并/串转换和串/并转换过程。在这一过程中,需要考虑两个方面问题。一是同步和时钟的恢复问题,二是高速串行差分信号传输过程中的直流漂移以及由此导致的误码率增加的问题。

串行传输中的同步问题,也就是数据的对齐,实际上是接收端解串器的一项重要功能。当并行的数据被计数进入到并串转换器时,与并行数据有关的字符边界就会在数据的串化过程中丢失。当串行的数据被接收并再一次转化为并行格式输出时,需要一种方法来重新识别字符序列的边界,即通过一种同步模式来完成。通常采用扫描搜寻特定的比特序列,即 comma 字符序列检测实现这一功能。解串器中的 comma 检测电路通过扫描

匹配 comma 字符序列来同步数据流。当然,在任意的字符序列组合里 comma 字符序列必须是唯一的,这需要通过预先定义协议格式来保证。

另外,同步的时间快慢也是同步问题的一方面。所有实际的串行接口都需要一种编码方法来确保最小的传输密度,以便于接收端的锁相环能够最小化同步时间。同时通过编码要保持传输过程中“0”、“1”信号数量的一致,用以消除信号序列中的直流分量。没有直流分量,发送器和接收器只进行交流耦合,也就不必考虑两端参考电压差异所带来的影响,从而提高错误容限。同时这也提供了较好的传输密度,有助于时钟恢复。

8b/10b 编码是高速串行传输常用的一种编码方案,此编码机制是由 IBM 开发的^[8],已经被广泛采用。8b/10b 编码机制是 Infiniband,千兆以太网, FiberChannel 以及 XAUI 10G 以太网接口采用的编码机制,它是一种数值查找类型的编码机制。将 8 位的数据转化为 10 位编码数据,用以提高传输特性,这些符号可以保证有足够的跳变用于时钟恢复。8b/10b 编码有 256 个数据字符(标为 D code)编码和 12 个控制字符编码(标

为 K code)。其中控制字符编码中就包含了具有 comma 字符特征的序列 (b0011111 或者 b1100000)。本系统中所采用的高速串化/解串器 TLK2711 内部采用的就是 8b/10b 编码机制,它是将 16 位输入一分为二进行处理的^[9]。

为了满足上述串行传输的要求,需要图像数据按照一定的数据格式输出给串化器。高速总线接口(HSBI)逻辑就是用来实现满足高速串行数据传输协议要求的的数据打包以及高速接口器件控制信号生成的功能。主要包含全色和彩色 10 位图像数据流的 2 级重组,CRC 校验码的生成,同步字和标识符的插入等功能,并最终按照一定格式(这里采用同步字+标识符+有效数据+CRC 校验码的打包格式)生成 16 位数据流。这里 CRC 校验和占用 4 个字节,码生成多项式采用 CRC-32(IEEE 802. 3): $X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^7 + X^6 + X^5 + X^4 + X^2 + X^1 + 1$ 即:

1-000-0100-1100-0001-0001-1101-1011-0111
 针对每路最低有效数据率高达 1.14 Gb/s 的

要求,这里 HSBI 提供 80 MHz 的时钟频率给 TLK2711 作为 16 位输入数据的伴随时钟,这样提供的数据带宽达到 1.28 Gb/s,满足系统要求。HSBI 输出的接口时序仿真波形如图 4 所示 (ModelSim6. 1FSE)。

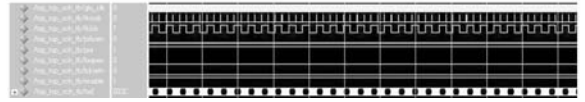


图 4 HSBI 接口时序仿真波形

Fig. 4 Time sequence simulation waveform of HSBI interface

3.2 高速串行光电接口

由于采用光纤通信,因此必须选择一种光收发器件作为系统通信的接口,以实现光电、电光信号转换。小型封装插拔式光纤收发模块 (Small Form-Factor Pluggable Optical Transceiver, SFP)是新一代的光收发器件,又称 MINI- GBIC 模块,具有小型化、可热插拔和自诊断功能。本系统中选用的是海信公司生产的 LTD1303 型 SFP 光收发模块,其具有数字诊断功能,满足 SFF-

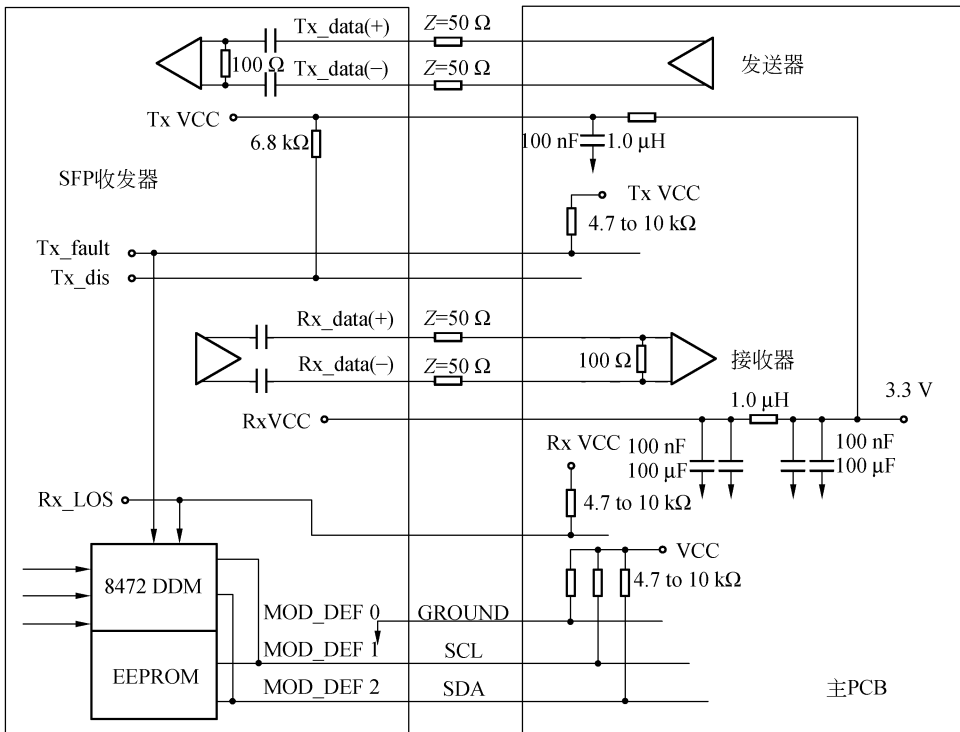


图 5 SFP 光收发模块的电气接口

Fig. 5 Electrical interface of SFP optical transceiver

8472 Rev 9.3 标准。通过该功能,可以实时监测光模块的温度、供电电压、激光偏置电流以及发射和接收的光功率。通过这些参数的测量可以简化维护工作,提高系统的可靠性。该光模块采用 1 310 nm 激光器,最高可支持 2 125 Mb/s 的数据传输速率,在 2⁷-1 反向不归零制(NRZ)伪随机比特流(PRBS)测试模式下误码率 $<1 \times 10^{-12}$,最大传输距离为 10 km^[10]。

基于带宽的要求,串化解串器和 SFP 光收发模块之间的高速串行传输 LVPECL 电平信号频率达到了 1.6 GHz,如此高的频率对此处的接口电路设计和 PCB 布线提出了很高的要求,需要考虑电源完整性、信号完整性,传输线理论以及高速 PCB 设计等诸多方面的内容。本系统为了保证高速差分信号的传输质量,减少振铃和反射现象的影响,PCB 设计采用擅长高速设计的 Allegro 软件完成。PCB 板采用多层结构,布线采取阻抗控制以及微带线策略,满足 LVPECL 差分线单端阻抗 50 Ω ,线间 100 Ω 的阻抗匹配^[11],并同时使线间延时最小。高速串行光电接口设计示意图如图 5 所示。

4 实验验证及部分系统指标

为了验证此光纤传输系统是否满足设计要求,分别采用内部自校图形发生器和实际 5 路 CCD 视频信号源对该系统进行了单路及多路同传实验验证。为了能够直观地观测到效果,传输的图像数据通过自制的光纤数据转接箱转换为 LVDS 相机接口并行数据格式,通过 IO 公司的 CL160 图像采集卡及配套软件,在计算机上直接获取图像信息。实验表明,系统工作稳定可靠,无误码,图像清晰,实时传输效果好,多路同传时无互扰现象发生。实际接收到的全彩色测试图像如图 6 所示。

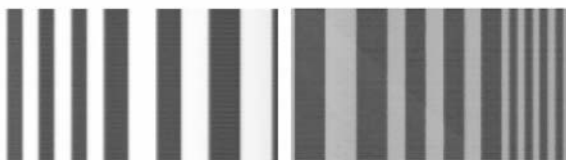


图 6 测试实验接收到的全色和彩色图像

Fig. 6 Pan and color images received by test experiment

高速 CCD 图像数据光纤传输系统部分系统指标如表 1 所示。

表 1 高速 CCD 图像数据光纤传输系统技术指标

Tab. 1 Technical indexes of high-speed CCD image data fiber transmission system

	系统参数	技术指标
C C D 视 频 部 分	视频输入阻抗	50 Ω
	视频输入电压	800 mV
	视频带宽	0-20 MHz
	A/D 转换位数	10 bit
	视频接口	BNC
	视频输入通道数	55
光 学 部 分	光源	F-P 激光器
	光发射功率	-3dB
	光电探测器	PIN/TIA 管
	光接收灵敏度	15 μ W
	光纤接口	LC
	光纤种类	单模 1 310 nm

5 结 论

本文所设计的基于光纤的 CCD 图像传输系统中,数字视频信号没有经过压缩即进行复接传输,系统传输速率很高,但由于光纤的带宽非常高,所以高数据率并没有对传输通道提出过高要求,而且该系统采用高数据率来保证视频信号的传输质量和实时性。实验证实该系统满足单通道 1.14 Gb/s,总有效数据传输速率为 5.7 Gb/s 的实际需求。同时采用 FPGA 作为控制处理核心,使得本设计通用灵活,能满足多种 CCD 成像系统的需要,如多抽头线阵 CCD、高帧频面阵 CCD 以及多片拼接 CCD 成像系统等,为多通道高速 CCD 图像数据的高速传输提供了一种很好的解决方案。

参考文献:

- [1] SHIMA R M, LOMHEIM T S. Performance characterization of high-speed analog video process signal-chain for use in visible and infrared focal plane application [J]. *SPIE*, 1997,3061:860-883.
- [2] HAN X Y, THOMAS R L, FAVRO L D. High-speed, high-resolution focal plane array imaging system final technical report [R]. *Detroit: Wayne State University. August 28,2000.*
- [3] DAKIN J P. Fiber optic links for high quality CATV transmission [C]. *IEE Colloquium on Optical Fiber Total Networks*, 1983(59):1011.
- [4] TJHUNG T T, SELVAN B, HALDAR M K, et al.. Single-mode 1.3 μm optical fibre link for analogue multichannel television [J]. *Electric Letter*, 1986(22):507.
- [5] 邱琪,宋玉娥,阳树宗.空间站信息系统与光纤通讯技术[J].电子科技大学学报,2000,29(4):365-368.

- QIU Q, SONG Y E, YANG SH Z. Spaces-station information system and fiber communication technology[J]. *Journal of UEST of China*, 2000,29(4):365-368. (in Chinese)
- [6] MIL-C-17, Cables, Radio Frequency, Coaxial Military Series Specifications[S].
- [7] ITU-T. G. 652, Characteristics of a Single-mode Optical Fibre and Cable[S].
- [8] WIDMER A X, FRANASZEK P A. A dc-balanced, partitioned-block, 8b/10b transmission code [J]. *IBM Research and Development Journal*, 1983,27(5):440-451.
- [9] Texas Instruments. Tlk2711 1.6 to 2.7Gbps transceiver datasheet [Z].2001.
- [10] Hisence. Ltd1303 SFP optical transceiver datasheet [Z].2005.
- [11] National Semiconductor. Lvds owner's manual, 3rd edition [Z].2004.

作者简介:



张 达(1981—),男,辽宁昌图人,博士研究生,2002年于东北师范大学获学士学位,2005年于东北师范大学获硕士学位,主要研究方向为语言和图像信号的高速处理与应用,空间光学成像技术。E-mail:mrzhangda@126.com

导师简介:



徐抒岩(1963—),男,辽宁岫岩人,研究员、博士生导师,1985年于天津大学获得学士学位,1989年于中国科学技术大学获硕士学位,主要研究方向为空间光学成像技术。E-mail:xusy@ciomp.ac.cn

●下期预告

航空斜视成像异速像移的实时恢复

李 仕^{1,2},张 葆¹,孙 辉¹

- (1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2.中国科学院 研究生院,北京 100039)

提出了一种异速像移补偿算法,解决了航空相机斜视工作时成像靶面的异速像移补偿问题。当载机侧身飞行时,航空相机会处于斜视状态,成像靶面上会同时出现多个不同大小的像移量。通过对异速像移产生机理的分析,根据像移量的不同将图像分成多个区。为提高算法的运算效率,将各区图像继续细分到像素线,用一维维纳滤波并行处理各像素线,最后将处理结果合并成结果图像。实验表明:本文算法的并行方案在 GPU 平台下 17.11 ms 内能恢复一帧 $2\ 048 \times 2\ 048\ 8\ \text{bit}$ 斜视模糊图像,恢复结果的 PSNR 达到 30.469,图像细节得到有效恢复。