模块化机载可见近红外焦平面系统

张达

(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:以航空机载遥感仪器为应用背景,提出了一种模块化焦平面系统,实际完成了最高帧频可达 300 fps 的大面阵可见近红外焦平面系统的研制。通过机电热一体化设计,提高焦平面技术集成度,避 免相互分离造成的信号衰减和易受干扰。同时将先进的高速光纤传输技术引入航空遥感领域,数据率 达到 1.6 Gbps 以上,保证高数据率的同时降低了系统互连的复杂程度,提高了数据传输的抗干扰能 力。阐述了系统设计思想及可见近红外 CCD 探测器工作原理,并对其中的机电热集成设计、高速总线 接口、高速光电接口等关键技术进行了详细分析。最终实现高帧频大面阵机载可见近红外焦平面系统 的小型化、轻量化及模块化,最高数据率达 2.5 Gbps,系统信噪比达到 400 以上。

关键词:模块化; 遥感; 焦平面

中图分类号: TN21; V243.5 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)08-2471-06

Modular airborne visible and near infrared focal plane system

Zhang Da

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

Abstract: Modular focal plane system was proposed under the airborne remote sensing instruments application background. The research and developement were finished that large array visible and near infrared focal plane system with 300 fps maximum frame rates. By the integrated design of mechanical and electronic and heat, and improving the FPA technology integration, signal avoid to be weakened and disturbed. The advanced high-speed fiber-optic transmission technology was taken into the aviation field of remote sensing, data rate of 1.6 Gbps or more, which ensuring the high data rate and reducing the complexity of the system interconnect, improving anti-disturbing capability of data transmission. Based on expounding the thought of system design and the structure of VNIR CCD detector, the key technologies among the system were analyzed such as mechanical and electronic and heat integrated design, high - speed data interface and high - speed serial photoelectric interface in detail. Finally the miniaturization, lightweight and modular are the features of developed large array airborne visible and near infrared focal plane system, its maximum data rate is up to 2.5 Gbps, SNR is up to 400 or more. Key words: modular; remote sensing; focal plane

收稿日期:2013-12-07; 修订日期:2014-01-19

基金项目:国家国土资源遥感系统集成与示范应用项目(1212011120227);吉林省科技发展计划青年基金项目(201101079) 作者简介:张达(1981-),男,博士,副研究员,主要从事空间光学遥感仪器的研制、空间光学成像、光谱探测技术方面的研究。 Email:zhangda@ciomp.ac.cn

0 引 言

21世纪以来,国内外成像及光谱遥感技术的应 用愈加广泛和深入,其应用领域已涵盖地球科学的 各个方面,在地质勘探和制图、大气和环境监测、农 业和森林调查、海洋生物和物理研究等领域发挥着 越来越重要的作用[1]。遥感仪器的搭载平台也从星 载、有人机载扩展到了无人机载。随着国内近年来经 济快速发展,在国土资源普查、自然灾害评估、突发 事件处置以及军事侦察等领域,机载尤其是无人机 载遥感技术应用需求愈加迫切[2]。无人机遥感是以 轻小型无人驾驶飞机为平台,装载可地面遥控或自 主控制的小型传感器,对地面目标及其周围环境进 行观测成像的一门新兴的综合性科学技术。与有人 驾驶的对地观测系统相比,无人机对地观测系统有 如下显著优点:系统研制周期短,成本相对较低;无 人驾驶,使用方便,安全性好;受场地、天时、天候等 因素限制较小,观测距离大大提高;可以做到高分辨 率近地观测。针对突发事件应对能力强,适于区域

性、专业性、多用途等场合。目前国内无人机可携带 的传感器在种类和功能上非常有限,性能指标较低, 大大限制了机载对地观测系统优势的发挥^[3]。针对无 人机遥感的现状,从工程化、实用化的角度,按照轻 小型、低功耗的要求,研制一套技术密集度较高的大 面阵高帧频可见近红外焦平面组件,可使成像及光 谱遥感仪器整机在尺寸、质量、功耗等方面更好地满 足中小型无人机或其他轻小型机载平台应用系统的 要求,大大提高成像及光谱遥感仪器的应用领域,弥 补国内无人机可携带的成像传感器在种类和性能上 的局限。

1 系统设计思想

1.1 系统组成和工作原理

模块化机载可见近红外焦平面系统由三个模块 构成:包括 CCD 及前端预放模块、CCD 驱动及偏置 电源模块、CCD 控制及处理模块,每种模块分别由 不同的组件和单元组成,具体系统组成如图 1 所示。 CCD 及前端预放模块由可见近红外面阵 CCD



图 1 系统组成框图



和前置预放组件组成,主要完成光电转换和 16 路模 拟 CCD 信号的匹配放大。CCD 驱动及偏置电源模 块由 CCD 驱动组件和偏置电源组件组成,主要用于 产生满足 CCD 正常工作所需的驱动信号和多种偏 置电压。CCD 控制及处理模块由时序控制及接口组 件和模拟视频处理组件构成,主要功能是产生正确 的 CCD 工作时序信号,将多通道 CCD 模拟信号进 行模/数转换形成数字量,完成图像数据的整合及格 式化打包,通过光纤和 Cameralink 接口两种方式输 出处理后的图像数据,通过控制接口与外部控制平 台以 RS422 方式进行通讯控制以及必要的遥测参数 传递;通过输入/输出接口接收外部的同步信号输 入,同时根据需要以 LVDS 形式接收或输出同步及 其他接口信号。

系统的处理及控制核心采用 FPGA 加以实现。 由于系统主要实现的是数字逻辑功能,同时要处理 多路并行数据,并以较高的频率输出图像数据,需要 具有较丰富的 I/O 资源和较强的处理速度,在此选 用 Xilinx 公司的 Vertex II Pro 系列高性能的 FPGA, 型号为 XC2VP40,其内部逻辑功能划分如图 2 所示。





Fig.2 FPGA internal function diagram

16 路VNIR 图像并行数据流在 FPGA 内部基于 时分复用原理完成图像数据的无缝缓冲与整合。整 合后的图像数据流和附加状态信息通过数传接口单 元逻辑经过数据重组打包成具有一定格式的 16 位 高速数据流输出给高速串化/解串芯片,并最终由光 收发模块转成光信号输出。与此同时,同步采用 Cameralink 协议规范(常用 Base 或 Medium 模式)以 12 位数据格式输出至 Cameralink 接口芯片^[4],变为 标准通用相机数据格式进行输出。

1.2 可见近红外 CCD 探测器

系统选用高帧频大面阵可见近红外探测器 VCCD1024H 作为系统的核心传感器。VCCD1024H 是背照减薄帧转移型高帧频大面阵 CCD 探测器, 波长响应范围为 0.4~1.0 μm,像元数 1 024×1 024, 具有高帧频、高灵敏度、低噪声等优点。为实现高 帧频的性能指标,探测器从结构上分为两个成像 区,分别配合两 个存储区和两套 16 个串行读出寄 存器,布局为对称结构,整个面阵探测器被分为 32 个通道单元,每个通道单元对应 512×64 个像素, 该探测器帧转移结构原理及对应不同波长范围的 量子效率曲线如图 3 所示^[5]。

帧转移型面阵探测器的帧频上限取决于帧转移的频率和像元串行读出的频率。帧转移时间是探测器工作帧频的一个关键因素,其内部成像区和存储区的多晶硅电阻和电容需要足够的充放电时间,其时间常数决定了帧转移的频率, VCCD1024H的帧转移时钟小于等于1 MHz,最大帧频可以达到150 fps或300 fps(2:1 合并),若采用 12 位量化,最大输出数据率可达 1.8 Gbps。该系统 设计根据实际需要,使用一半的成像区,并选取部 分行输出进行成像实验。



Fig.3 Frame transfer structure and QE of VCCD1024H

2 关键技术

2.1 机电热一体化集成设计

为具有更好的航空飞行平台适应能力,应尽可 能减小系统体积,提高技术集成度,同时由于组成系 统的各个模块间信号互联关系比较复杂,要对系统 设计进行综合考虑,采取机电热一体化设计技术。为 保证各模块布局的合理性和相互间结构配合的准确 性,机电接口设计采用了三维建模及装配,集成装配 图如图 4 所示。



图4 模块化焦平面集成装配图 Fig.4 Integrated modular focal plane assembly drawing

与此同时,为保证机热接口的合理性,确保该 系统具有良好的散热特性,根据不同元件器的功 耗以及封装材料和热阻的差异,对焦平面系统进 行了三维建模和给定条件下的热分析,结果如图 5 所示。分析可知,在环境温度 25℃,静态空气对流, 没有结构导热措施的情况下,整个系统温升后的 最高温度不超过 77℃。对温升比较明显的部分采 取适当的散热措施即可保证良好的温度水平。



图 5 热分析三维建模及仿真结果 Fig.5 Thermal analysis 3D modeling and simulation result

2.2 高速总线接口

利用光纤技术进行高速数据传输,光收发模块 对输入电信号进行电/光转换获取的是高速串行差 分信号,这就涉及到模/数转换后的并行数据流进行 串行转换的过程,在此由高速串化器实现,接口电平 为 LVPECL 电平标准。在这一过程中,需要考虑的 主要是信号同步和时钟的恢复问题以及传输过程中 的直流漂移问题^[6]。

实际的高速串行接口都需要一种编码方法用 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。光收发模块两端进行交流耦合 可以提高错误容限,同时也保证了较好的传输密 度,有助于时钟恢复^[7]。

8 b/10 b 编码是由 IBM 开发的一种高速串行传输中常用的编码方案^[8],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。该系统中所采用的高速串化器采用的就是 8 b/10 b 编码机制^[9]。

为满足高速串行数据传输的要求,就需要图像 数据按照一定的数据格式输出。数传接口单元中的 部分逻辑就是用来实现满足高速串行数据传输协议 要求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 16 路模拟信号图像数据流和状态信 息的整合及打包, 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生成 16 位并 行数据流。CRC 校验和采用码生成多项式 CRC-32 (IEEE 802.3), 即:

$$X^{32} + X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^{8} + X^{7} + X^{5} + X^{4} + X^{2} + X^{1} + 1$$

针对系统较高数据率的需求,这里采用 80 MHz 时钟频率作为高速串化器 16 位输入数据的伴随时 钟,使传输数据率达到了 1.6 Gbps,满足系统要求。 提高伴随时钟频率可大大增加数据带宽,该系统可 实现最高 2.5 Gbps 的传输数据率。高速数传接口相 关逻辑仿真波形如图 6 所示。



图 6 数传接口时序仿真波形 Fig.6 Data transmission interface timing waveform

2.3 高速光电接口

由于采用光纤传输方式,需选用光收发器件作 为数传接口实现电光信号的转换。考虑到系统数据 传输的高速率,该系统选用 SFP 型光收发模块,最高 数据率可支持 2.5 Gbps,该光收发模块采用 1.3 μm 激光器,具有使能信号,收发一体,便于控制^[10]。

基于数据带宽的要求,高速串化器和光收发 模块之间的高速差分串行传输电平信号频率大于 1.3 GHz,如此高频率对接口电路设计和 PCB 布 线提出了很高的要求,需要考虑传输线理论、PI、 SI 以及高速 PCB 设计等诸多方面的内容^[11]。为保 证系统高速串行光电接口差分信号的传输质量, 减少反射和振铃现象的发生,实际设计过程中采 取充分的原理仿真和 PCB 后仿真,以保证最终设 计结果的准确性。高速串行光电接口设计示意图 如图 7 所示。

串行光电接口高速差分信号 PCB 后仿真及实测 波形如图 8 所示。



图 7 SFP 光收发模块电气接口

Fig.7 Optical transceiver module electrical interface



图 8 高速串行光电接口 PCB 后仿真及实测眼图波形 Fig.8 High speed serial optical interface PCB post simulation and measured eye diagram

3 实验验证及部分性能指标

为验证模块化焦平面系统是否满足设计要求, 对 Cameralink 数传接口、高速光纤传输接口、RS422 通讯接口等进行了功能和性能指标测试,同时进行 了初步的成像实验和信噪比评估,信噪比是评价成 像仪器成像质量的重要参数之一^[12]。相关测试及实 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,实验获取的局部图像如图 9 所示,暗场 下系统噪声及近饱和条件下信噪比实测指标如图 10 所示,各通道信噪比均达到 400:1 以上。



Fig.9 Experimental image



可见近红外焦平面系统部分系统指标如表1所示。

表1 可见近红外焦平面系统技术指标 Tab.1 VNIR focal plane system specifications

System parameter	Technical index
Wavelengh	0.4-1.0 μm
Image format (max)	1 024×512
Frame frequency (max)	150 fps
	300 fps(2:1 binning)
Video bandwidth	30 MHz
A/D quantization	12 bits
Laser emission power	- 10 dB to - 3 dB
Photoelectric detector	PIN PD/LD
Fiber interface	LC
Fiber type	single mode 1.3 μm
Fiber data rate	1.6-2.5 Gbps
Cameralink data rate	960 Mbps
Communication and other interface	RS422/LVDS

4 结 论

文中所设计的模块化可见近红外焦平面系统将 通常分离的前置预放部分和时序驱动、视频处理以 及时序控制部分较高密度地集成,有效降低了整机 的体积和质量。采用光纤传输和 Cameralink 接口传 输,在简化数据传输复杂程度的同时又保证了兼容 性。采用 FPGA 作为控制处理核心和模块化的设计 思想,使得该系统通用灵活。该系统研制实现了机载 可见近红外焦平面的轻量化、小型化和模块化,能满 足多种机载成像遥感、光谱遥感、成像光谱遥感等领 域的需要。

参考文献:

[1] Mei Anxin, Peng Wang, Qin Qiming, et al. Introduction to Remote Sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)

梅安新, 彭望, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育 出版社, 2001.

Qian Lexiang, Pan Xueqin, Zhao Qian. Advances in the [2] application and researches of hyperspectral imaging remote sensing in China[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2004(2): 1-6. (in Chinese)

钱乐祥, 泮学芹, 赵芊.中国高光谱成像遥感应用研究进展 [J]. 国土资源遥感, 2004(2): 1-6.

- [3] Jin Wei, Ge Hongli, Du Huaqiang, et al. A review on unmanned aerial vehicle remote sensing and its application[J]. Remote Sensing Information, 2009(1): 88-92. (in Chinese) 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况 [J]. 遥感信息, 2009(1): 88-92.
- [4] Ren Hang. High resolution large area CCD camera frame rate design and its non-uniformity correction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1491-1497. (in Chinese) 任航. 高分辨率大面阵 CCD 相机高帧频设计及其非均匀 性的校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1491-1497.
- [5] Sarnoff Corporation. VCCD1024H datasheet [Z]. 2006.
- Zhang Da, Xu Shuyan. High speed CCD image data [6] transmission system based on fiber [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 207-213. (in Chinese) 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): 207-213. (in Chinese)
- [7] Zhang Da, Xu Shuyan. High-speed serial transmission system for image data based on TLK2711 [J]. Microcomputer Information, 2009(3): 291-293. 张达, 徐抒岩. 基于 TLK2711 的高速图像数据串行传输系 统[J]. 微计算机信息, 2009(3): 291-293.
- [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. TIk2711 1.6 to 2.7 Gbps transceiver datasheet [Z]. US: Texas Instruments, 2001.
- [10] Sumitomo Electric. Technical specification for optical transceiver module [Z]. 2006.
- [11] National Semiconductor Corporation. Lvds owner's manual, [Z]. 3rd ed. US: National Semiconductor Corporation, 2004.
- [12] Chen Yuheng, Ji Yiqun, Zhou Jiankang, et al. Signal to noise ratio evaluation of airborne visible - infrared hyperspectral imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2300-2303. (in Chinese) 陈宇恒,季轶群,周建康,等.机载可见-红外超光谱成像 仪信噪比的估算[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2300-2303.