

无人机光电载荷图像处理器的设计

鲁剑锋

(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:介绍了无人机载设备的技术特点及机载小型图像处理器的组成。采用TI公司的数字信号处理器芯片为核心处理器,配合现场可编程逻辑器件(FPGA)与外部管理微控制单元(MCU)来实现目标数据的采集与处理,设计了适用于无人机光电载荷的超小型图像处理器系统。针对机载设备的特点,设计时充分考虑了体积、重量、功耗等要求。该系统已应用于多台套机载光电载荷中,工作稳定可靠,满足无人侦察机对捕捉和定位目标的要求。

关键词:无人机;光电载荷;数字信号处理器;图像处理器

中图分类号:V243.5; V279 **文献标识码:**A

Design of image system in opto-electrical payloads on UAV

LU Jian-feng

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

Abstract: Technological characteristics of opto-electrical payloads for an Unmanned Aerial Vehicle(UAV) are introduced and the configurations of the compact image processor on the UAV are also described. By taking a Digital Signal Processor(DSP) chip as core processor and using Field Programming Gate Array(FPGA) and Micro Controlled Unit(MCU) to acquire and process target data, a compact image processor system is designed. The requirements of volume, weight, power consumption in the design are fully considered as features of airborne equipment. This system has been used in multiplied opto-electrical payloads. It works stably and reliably and meets task requirements of trapping and locating for UAVs.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle(UAV); opto-electrical payload; Digital Signal Processor(DSP); image processor

1 引言

无人机作为一种特殊的战场武器,其武器化

趋势及其未来作战应用越来越引起世界各国的重视。特别是小型无人机,如美国陆军的“乌鸦”无人机等,已以其隐蔽性强,操作简单,成本低的特点,成为世界各国军方关注的焦点。无人机载光

电侦查载荷主要用于实现战场环境的监测,战场目标的识别和跟踪。随着无人机任务载荷的发展和进步,探测手段也从原始的胶片照相机,发展到现今的可见光 CCD、红外热像仪传感器以及激光指示器等。2002年,美国“捕食者”无人机安装了雷神公司研制的 AN/AAS-52 多频谱目标指示系统,该系统集成了红外、彩色光电照相机和激光指示器^[1]。未来的无人机上还将安装多波段传感器来满足用户对多频谱和高频谱数字光电设备的需求,而图像处理器作为判断、识别目标并引导光电任务载荷跟踪目标的主要设备,在现今的无人机侦查设备中有着不可替代的作用。

本文对无人机载设备的技术特点和机载图像处理器的构成进行了研究,利用数字信号处理(DSP)芯片作核心器件,结合现场可编程门阵列(FPGA)和微控制单元(MCU)设计并研制了适用于无人机光电载荷的图像处理器,该处理器具有体积小、重量轻、功耗低等优点。

2 无人机载设备的技术特点

根据无人机自身的特点,无人机载设备有着与其他载体设备不同的要求:

(1) 无人机载设备受到无人机体积的限制,其线路板的体积、形状都受到约束;

(2) 由于无人机,特别是小型无人机的载荷能力有限,要求机载的任务载荷重量轻,以便飞机能够尽可能多地携带任务载荷。例如 EADS 公司研制的微型无人机重量约 500 g,携带的传感器重量仅为 50 g。美国陆军的“乌鸦”无人机和海军陆战队的“龙眼”无人机上的红外侦查设备是被称为“欧米茄”的红外照相机,重量不到 200 g,功耗 < 1 W^[2];

(3) 无人机提供的电源功率有限,不能像地面设备一样通过市电或者油机提供大功率电源,因此,要求机载的任务载荷功耗低。同时,无人机提供的电源范围较宽,通常要求载荷在(24 ± 10) V 的范围内都能够正常工作^[3]。

基于以上的特点,本文设计了基于 TI 的 TMS320C6416DSP 的小型机载图像处理器,系统

呈圆形,直径为 97 mm,重量为 35 g,电源为 +12 V ~ +36 V,功耗 < 5 W。

系统采用 DSP + FPGA + MCU 的构架,实现了从图像数据的采集、处理到输出的过程。

3 机载小型图像处理器的硬件构成

针对机载图像数据量大的特点,采用了美国 TI 公司的高速数字信号处理器—TMS320C6416 为主处理器。同时,为了保证系统的实时性,以现场可编程门阵列器件 FPGA 作为系统的逻辑控制及时序处理器,使用 MCU 单片机 C8051F023 芯片作为外围接口控制处理器,配合以高速的 Camera-link 视频解码、编码器件等,构成了实时高速数字图像处理系统,其原理框图如图 1 所示。

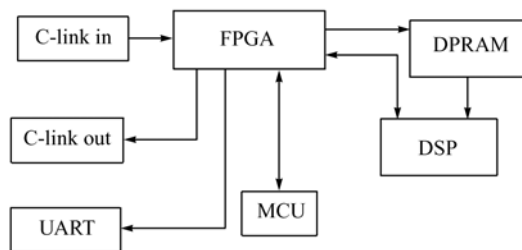


图 1 DSP 图像处理系统硬件原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware for DSP image processing system

系统的工作原理为: Camera-link 解码芯片 DS90CR286 接收由 CCD 给出的视频信号,经过解码得到图像信息、采样时钟以及行、帧同步信号,并将信号转化为标准 TTL 电平信号,发送到 FPGA 芯片中。FPGA 芯片作为整个系统的逻辑、时序控制芯片,不仅控制图像数据的传输,同时,负责 DSP 与 MCU 的实时数据交换。系统时序以 Camera-link 解码出来的视频帧同步信号为整个系统的时钟信号,这样, DSP 芯片在图像的采集和处理过程中,不会被通讯等其它事件所打断,计算出来的目标位置等信息能够实时地通过 FPGA 传输给 MCU 芯片。MCU 芯片同样以帧同步信号为消息,从 FPGA 芯片中读取 DSP 的信息,同时,将系统对外串口得到的消息通过 FPGA 芯片发送给

DSP。MCU 负责系统的对外通讯工作,通过 RS422 串口芯片实现与无人机系统的数据交换。MCU 芯片对外通讯采用中断方式,收到外部通讯请求,立即响应中断,确保与系统数据交换的实时性;通过 FPGA 对内通讯,采取查询方式,在没有外部通讯中断的情况下,实时查询帧同步信号,查询得到帧同步信号后,通过 FPGA 进行图像处理器内部的数据交换工作^[4]。

图像数据的传输过程为:Camera-link 解码芯片将图像数据按照帧同步及采样时钟信号发送到 FPGA 芯片中,FPGA 芯片将数据分成两路,一路提供给 DSP,用作图像处理;另一路发送给 Camera-link 编码芯片。提供给 DSP 的图像数据,在 FPGA 芯片内部设置两个双端口 RAM (DPRAM)^[5],将奇数行与偶数行的图像数据分别交替写入两个 DPRAM 中。根据 DSP 芯片发出的指令,FPGA 将相应区域图像的第一行图像数据写入一个 DPRAM 中,然后通知 DSP 进行读取图像数据,在 DSP 读取图像数据时,FPGA 将下一行的图像数据写入另一个 DPRAM 中,依次交替进行乒乓操作^[6]。这样,在可选择的任意大小范围内的图像数据依次存入 DSP 的内存中。同时,FPGA 将用于输出的图像数据发送到 Camera-link 编码芯片 DS90CR285 中,对图像进行 Camera-link 协议编码,通过 Camera-link 接口输出。

系统的主要特点是:

- (1) DSP 处理器在 600 MHz 时钟工作时,处理能力可达 4 800 MIPS;
- (2) DSP 外扩主频为 166 MHz 的 SDRAM, SDRAM 容量为 4 MByte;
- (3) DSP 带 8MBIT FLASH ROM^[7] 的程序存储器;
- (4) FPGA 对图像进行滤波、边缘预处理等工作;
- (5) MCU 负责与外部进行串行数据通讯;
- (6) 具有 JTAG 端口,支持实时的仿真调试^[8];
- (7) 低电平逻辑数字电路设计,降低功耗。

全面采用 BGA 封装及小型表贴封装器件,器件工作的 IO 电压全部为 3.3 V,减小了 PCB 尺寸,降低了功耗,增强了系统兼容性与可靠性。

3.1 TMS320C6416 数字信号处理器

TMS320C6416 是 TI 公司于 2007 年推出的 TMS320C6000 系列处理器中的一款主流图像处理器,处理器片内总线采用的是修正的哈佛总线结构^[7,8]。针对无人机载设备的环境适应性要求,系统选用了 TMS320C6416GLZA6E3 宽温处理器,工作温度为 $-40 \sim 85$ °C,时钟主频为 600 MHz;采用了 C6000 系列标准的甚长指令字 (VILW) 结构,每个时钟周期可读取指令总字长为 256 bit。系统在设计时采用 DSP 片内的 PLL 电路对外部时钟进行倍频^[8],采用 50 MHz 的晶振作为提供给 DSP 芯片的工作晶振,用片内的 PLL 电路对 50 MHz 时钟进行 12 倍频,这样,避免了高频晶振及高频线路引起的电磁兼容问题。TMS320C6416 片内集成了 1M-BYTE 的 DATA RAM 和 PROGRAM RAM^[7]。

DSP 对片外存储器的访问是通过两个外部存储器接口 (EMIFA&EMIFB)^[7] 来实现的。

DSP 的 EMIF 可以扩展的存储器接口包括^[5]:

- (1) 同步突发静态 RAM (SBRAM) 存储器;
- (2) 同步动态 RAM (SDRAM) 存储器;
- (3) 异步存储器,如 SRAM, FLASH, FIFO 等^[8]。

选用 SDRAM (HY57V653220B) 作为 DSP 的缓存,进行图像数据等的缓存。SDRAM 的接口采用 DSP 芯片提供的无缝接口,接口速度为 $1/2$ CPU CLOCK^[9],占用 DSP 接口的 CE2 空间^[9]。

图像数据从 FPGA 到 DSP 的传输,由 EDMA 控制寄存器把图像数据以 EDMA 方式导入 DSP 中^[7]。DSP 使用异步存储器接口与 FPGA 片内的 DPRAM 相连接,通过 EDMA 进行图像的导入工作^[10],不占用 DSP 芯片的 CPU 资源,而是由 EDMA 控制器来完成图像导入的工作,从而将 DSP 的 CPU 资源完全用来实现图像处理算法^[11]。

DSP 程序存储在外扩的一片 Flash 芯片中 (ATMEL 公司的 AM29LV800 芯片),上电复位时将程序自举^[12],导入 DSP 内。系统采用 MAP1 存储器映射方式^[13],Flash 闪存占用 DSP 的 EMIFB 的 16 bit 接口空间,SDRAM 与双口 RAM 占用 DSP 的 EMIFA 的 32 bit 接口空间^[14]。

3.2 逻辑主控 FPGA 芯片

系统选用的主控逻辑芯片是 Altera 公司的 Cyclone II 系列的 EP2C35F672I8, 该芯片的核电压为 1.2 V, IO 接口电压为 3.3 V, 同时支持 1.5、1.8 和 2.5 V LVTTTL 电平的 IO 输入和输出^[8]。低电平的 IO 电压为高速信号传输提供了可能, 确保了图像数据存储的实时性和完整性^[2]。采用 EPCS4 串口 ROM 芯片作为 FPGA 的配置芯片, 系统上电后, EPCS4 芯片将程序自举加载到 FPGA 中^[9,12]。

3.3 对外通讯管理芯片 MCU

无人机系统的实时通讯往往与图像的帧信号不同步, 而二者都要求实时性, 因此, 图像处理器在设计上选用了 Silicon Labs 公司的 C8051F023 单片机芯片, 作为对外通讯的管理芯片, 配合 FPGA 芯片完成图像处理器与无人机系统及图像处理器内部的数据交换。这样, 既保证了图像处理器与系统的数据交换的实时性, 又保证了 DSP 在图像处理过程中的连续性^[4]。

C8051F023 芯片采用高速的 8051 μ C 核, 具有很好的兼容性。芯片使用 3.3 V 电源供电, 比传统 5 V 供电的单片机功耗更小。芯片提供内置的 2~16 MHz 可编程时钟振荡器^[8]。图像处理器采用芯片内部的 16 MHz 时钟作为芯片的工作时钟。芯片内部提供 4 Kbit 的数据存储器以及 64 Kbit 的 Flash 程序存储器。

3.4 上电程序加载与复位

图像处理器采用 TI 公司的 TPS3824 复位芯片作为整板的上电复位芯片。DSP 及其程序存储芯片、MCU 芯片和串口芯片等都使用 TPS3824 复位信号。而 FPGA 芯片因为不需要复位信号, 所以使用 FPGA 芯片提供的 TPS3824 看门狗信号^[12]。

系统的 DSP 芯片、FPGA 芯片以及 MCU 芯片都需要上电进行程序的加载工作。其中, DSP 与 FPGA 芯片从片外的存储器进行程序加载, MCU

芯片从芯片内部的 Flash 存储空间进行程序的加载。这样, 产生了程序加载的时序问题, 即 DSP 与 MCU 加载没有完成, FPGA 已经加载完毕并发出了相应的初始化的指令; 或者 DSP 加载完毕, 而 FPGA 没有完成程序的加载, 造成 DSP 与 MCU 之间的初始化指令不通等故障。为了避免产生加载时序的问题, 图像处理器在设计上选择了应答的模式。FPGA 芯片不需要复位芯片提供的复位信号, 同时, FPGA 芯片提供给复位芯片看门狗信号, 也就是说, FPGA 不提供看门狗信号, 复位芯片将会进行图像处理器系统的复位^[9]。因此, 在 DSP 与 MCU 程序设计时, 设计了应答激活模式^[13]。FPGA 芯片加载完成后, 将向 DSP 芯片与 MCU 芯片发出固定地址的高电平信号。DSP 与 MCU 芯片在程序设计的初始化工作完成后, 在循环中等待, 读取相应地址的信号。收到信号, 则证明 FPGA 芯片已经完成初始化, 立即向 FPGA 发出应答信号, 同时, 可以进行图像处理或者系统通讯。若没有收到信号, 则表示 FPGA 芯片初始化没有完成, DSP 与 MCU 就在循环中不停地读取相应地址信号, 直至收到 FPGA 信号为止。FPGA 芯片初始化完成后, 发出相应的信号, 然后等待 DSP 与 MCU 的应答信号, 同时, 发送固定电平信号给复位芯片的看门狗^[15]。若 1.6 s 内仍未得到 DSP 与 MCU 的应答信号, 则复位芯片进行系统复位, DSP 与 MCU 重新进行复位, 程序加载。

4 结 论

本文采用 DSP + FPGA + MCU 的硬件结构, 设计并研制了适用于无人机光电载荷的图像处理器, 与原有的其他机载图像处理器系统相比, 该处理器具有体积小、重量轻、功耗低等优点。同时, 整板采用小型、贴片型器件, 系统的可靠性高。该处理器已应用于无人机系统中, 工作良好, 性能可靠, 能够满足无人机光电载荷的任务需要。

参考文献:

- [1] 石岚. 外军无人机光电侦察监视载荷研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(9): 103-106.
SHI L. Research on UAV electro-optical reconnaissance and surveillance payloads[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(9): 103-106. (in Chinese)
- [2] 秦明, 朱会, 李国强. 军用无人机的的发展趋势[J]. 飞航导弹, 2007(6): 36-38.

- QIN M, ZHU H, LI G Q. The development of UAV[J]. *Winged Missiles J.*, 2007(6):36-38. (in Chinese)
- [3] 韩冰. 战术无人机的任务载荷与发展分析[J]. *舰船电子工程*, 2007, 27(3):31-35.
HAN B. Load task and development analysis of tactical UAV[J]. *Ship Electronic Eng.*, 2007, 27(3):31-35. (in Chinese)
- [4] 代少升, 张新立. 利用单片可编程系统对红外焦平面阵列进行实时非均匀性校正[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4):854-858.
DAI SH SH, ZHANG X L. Real time nonuniformity correction of infrared focal plane arrays by system on programmable chip[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):854-858. (in Chinese)
- [5] 刘彬, 房建成, 刘刚. 基于 TMS320C6713B + FPGA 数字控制器实现磁悬浮飞轮主动振动控制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):151-157.
LIU B, FANG J CH, LIU G. Implementation of active vibration control for magnetically suspended flywheels based on TMS320C6713B + FPGA digital controller[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):151-157. (in Chinese)
- [6] 陈升来, 黄廉卿, 郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及 DSP 实现[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3):498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):498-502. (in Chinese)
- [7] TMS320C64XX Peripherals Reference Guide[G]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [8] TMS320C64XX CPU and Instruction Set Reference Guide[G]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [9] 姜培培, 裘燕青, 傅志辉, 等. 基于 DSP 和 FPGA 的多路型光纤光谱仪系统[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):944-948.
JIANG P P, QIU Y Q, FU ZH H, *et al.*. DSP and FPGA based multi-channel fiber-optic spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):944-948. (in Chinese)
- [10] 王晓东, 刘文耀, 金月寒, 等. 基于 DSP 和 CPLD 的激光雷达图像采集和显示集成系统[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(2):190-194.
WANG X D, LIU W Y, JIN Y H, *et al.*. Laser radar image acquisition and display integrated system based on DSP and CPLD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2):190-194. (in Chinese)
- [11] 许廷发, 赵思宏, 周生兵, 等. DSP 并行系统的并行粒子群优化目标跟踪[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9):236-240.
XU T F, ZHAO S H, ZHOU SH B, *et al.*. Particle swarm optimizer tracking based on DSP parallel system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):236-240. (in Chinese)
- [12] 代少升, 袁祥辉. 提高 DSP 图像处理系统实时性的一种有效方法[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(6):617-620.
DAI SH SH, YUAN X H. Improvement of DSP image processing real-timeness[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6):617-620. (in Chinese)
- [13] 张思芳, 李正明. 一种实时成像跟踪系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6):573-577.
ZHANG S F, LI ZH M. Study of an image tracking system based on DSP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6):573-577. (in Chinese)
- [14] TMS320C62xx Peripherals Reference Guide[G]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 1999.
- [15] 朱明, 鲁剑锋, 赵建, 等. 基于 TMS320C6202 DSP 的实时数字图像处理系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5):497-501.
ZHU M, LU J F, ZHAO J, *et al.*. Design of real-time digital image processing system based on digital signal processor TMS320C6202[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5):497-501. (in Chinese)

作者简介: 鲁剑锋(1978—), 男, 吉林长春人, 研究生, 助理研究员, 主要从事嵌入式系统的设计、图像模式识别等方面的研究。E-mail: pc80586@sina.com