

〈系统与设计〉

16 位高精度在线式红外热像仪的技术方案与实现

丁德红^{1,2,3}

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 洞庭湖生态经济区建设与发展协同创新中心, 湖南文理学院, 湖南 常德 415000; 3. 贺州学院, 广西 贺州 542899)

摘要: 为了红外热像仪易于产品化、国产化, 提出了一套非接触在线测温的整体技术方案。该技术方案主要利用 Flir 的 TauII 机芯和达芬奇 ARM+DSP 双核视频处理器 DM6446 两大主要器件, 经二次开发后的视频驱动程序使 DSP 的 CCD 视频接口能直接驱动 Flir 机芯的 CMOS 接口, 改进后的 RTSP 协议进行红外热图的网络传输。与国内外同类方案相比, 省却了 FPGA 进行电平信号转换的环节, 也无需视频解码芯片, 从而使方案精简和低成本。经比较抓拍测试模式下的 raw 格式文件, 与 Flir 原装整机所拍效果完全相同, 标定后的拟合方程近似线性完全满足测温要求, 可以推广量产, 加速摆脱红外热像仪对进口的依赖。

关键词: 红外热成像; 在线非接触测温; 16 bit 精度

中图分类号: S24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2017)09-0841-07

Online Temperature Measurement Technology Solutions and Implementation of 16 bit Infrared Thermal Imager

DING Dehong^{1,2,3}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Province Cooperative Innovation Center for The Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China; 3. Hezhou University, Hezhou Guangxi 542899, China)

Abstract: An integral technological solution that realizes non-contact online temperature measurement is proposed based on the principle of infrared thermal imaging to facilitate easy productization and localization of infrared thermal imager. This solution utilizes FLIR's Tau II module and the Davinci DM6446 ARM+DSP processor as the two main components. The DSP CCD video interface driven by a customized video driver program can directly drive the CMOS interface of the FLIR module. An improved RTP/RTSP protocol can transfer the data of an infrared thermal image through a network. Compared with other similar solutions, the conversion of signal level and image preprocessing in the FPGA circuit are skipped and a video encoder chip is unnecessary. Owing to these advantages, the solutions are simple and low-cost and consequently, easy for production. Using the snapping same logo test, upon comparing raw-format files obtained from the FLIR module, the picture qualities are observed to be similar. After calibration, the temperature curve approximates to a linear fitting equation, which satisfies the requirement of temperature measurement. Therefore, this solution can promote mass production and enable the elimination of the dependence of infrared thermal imager on imports.

Key words: infrared thermal imaging, on-line non-contact temperature measurement, 16 bit accuracy

收稿日期: 2016-08-19; 修订日期: 2016-12-23.

作者简介: 丁德红 (1975-), 男, 湖南常德市人, 高级工程师, 在站博士后, 主要研究方向为: 嵌入式系统设计、图形图像处理, 机器视觉, 系统集成与信息系统项目管理。E-mail: dingdehongteacher@qq.com.

基金项目: 湖南省科学计划 (2016GK2019); 湖南省教育厅一般项目 (16C1089); 湖南文理学院博士科研启动基金。

0 引言

红外热成像行业,最开始应用于军事领域的红外制导,红外夜视^[1],1945 时冲绳岛上的美国登陆攻击,开始使用红外夜视仪。1948 年美国的“响尾蛇”导弹使用了红外制导技术。20 世纪 70 年代以来,逐渐转向民用,如:微细加工区的红外辐射测温技术^[2],在 70 年代末国内外都比较活跃;90 年代初,文献中出现了大量红外光谱应用的报道^[3],1999 年石科院与兰州炼油厂合作,研发并投入运营了在线近红外分析系统,开创了红外在线应用先河,2006 年报道了利用红外热像仪实现了化学腐蚀区热场的实时监测。徐小龙利用热成像研究了感染番茄花叶病的番茄叶片表面温度的变化与叶片病变程序的关系^[4],周健民等用红外热成像进行苹果表面缺陷检测^[5],黄树青等用红外热成像研究工程创面植被恢复的温室效应^[6],文献^[7]则讲述了用红外热像仪用于群落冠层温度测定的普适方法和步骤。随着非制冷红外技术的进一步发展为小型化移动化提供了可能,国内规模化研发与生产主要集中在最近 10 年,2016 年 9 月 8 日国际红外成像高端论坛上主要红外企业(广州飒特、武汉高德、浙江大立、北方广微、上海巨哥等)均已展示了自主知识产权的探测器产品,中国企业已基本突破国外垄断,并由军事进入家庭安防、消费类电子、汽车等新兴市场,红外热像行业由此走向大众。

目前工农业测温系统仍然以传感器加单片机的接触式点温型为主^[8-10],在温度超过 1000℃ 时温漂大;工程实施与使用时,需逐点安装费时费力效率低下,存在测温盲点、可靠性差等不足。非接触在线式热成像测温可快速提供温度测量,且特别适合恶劣环境或接触测温较困难的情况下进行,因此升级成面扫描型的在线式非接触红外热成像十分必要,往往又受制于成本制约。纵观红外热成像测温的文献,多侧重于图像增强方面的效果处理,从文献^[7-10]所使用的设备型号来看均为进口设备,罕有国产品牌,因为企业商业保密的需要公开的文献中找不出能产品化的红外热像仪完整方案。本文设计出一套可行可操作的在线非接触红外热像仪整体技术方案,成本低,易于产品化,助力红外成像大众化。

1 红外测温领域的现实问题

1.1 点温多于面温,军用多于民用,工业多于农业

如粮库测温,是在粮仓中按一定的分布密度,放置温度传感器,不可避免地存在温度盲点或漏点;温泉、水井等液体测量温度时多是用温度计,按一定时

间间隔采样,存在实时性差的问题;红外成像由军转民,故军用多于民用;在农业上的应用,收益往往小于投资,除自然保护区外,鲜有规模化应用。

1.2 公开的产品化方案匮乏

红外热像仪早期是从国外引进,在起步阶段模仿多于创新,如模仿国外的产品架构时把 FPGA 部分也照搬过来了,要么 FPGA+ARM^[11-13],要么 FPGA+DSP^[14],也有 MCU+CPLD^[15];FPGA/CPLD 在此类方案中多用于电平转换和信号格式转换及部分图像处理,导致电路复杂开发难度大,工程师研发的连续性也很难保障;更有甚者,在没有 ARM/DSP 技术积累的情况下,用诸如 PC104 的工控板来进行数字信号处理,功耗大导致在封装空间内发热量也大,影响设备的稳定性和寿命。比较了市面上十余款图像处理开发板后,发现均是采用模拟接口,而红外测温宜用数字接口。

1.3 高端探测器依赖进口,产品价格高

国产探测器虽已突破垄断,但成熟度、批量化尚需时日,高端探测器市场份额主要还是被 ULIS、Fluke 和 Flir 等国外厂商占据,价格比点温设备高很多,工业级手持式起步价 7~8 万元,在线式起步价 11~12 万。价格高的另外原因是,大部分红外企业为避免同质竞争,都进行了差异化或定制化二次开发,增加了成本,导致其产品的价格优势并不明显。

2 系统设计的总体架构

2.1 红外热像仪组成

如图 1,物体的红外辐射经过由镜头(Lens)组成的光学系统聚集到探测器(Sensor)上,探测器把入射的热辐射转换成电平信号,电平信号经视频处理单元(ARM+DSP 双核)进行数字图像处理,转换成在显示设备上可见的红外热图,有了热图便能计算出目标物体的温度。

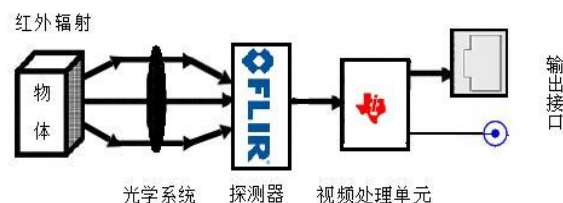


图 1 红外热像仪组成

Fig.1 The infrared thermal imager structure

2.2 红外热像仪总体设计

红外热像仪的设计,是基于 DSP 实现红外辐射能量从前端光学系统到 PC 上位机的实时显示,主要由前端光学系统、Davinci DM6446 双核(ARM+DSP)

处理器^[16-20]及 PC 上位机构成, 如图 2 所示。前端光学系统由镜头和探测器组成, 探测采用 FLIR 公司的 Tau, 能够提供 640×480 像素的红外图像信号源。数据经过 Davinci 处理后, 以 H.264 压缩视频流和 RAW 无压缩两种格式同时通过以太网传输至 PC 上位机。处理器通过 RS232 串口对探测器进行设置, 也能控制转动云台和镜头调焦覆盖 360°视场。在 PC 端 H.264 码流经过解码后可以预览, RAW 格式则用于红外测温计算。

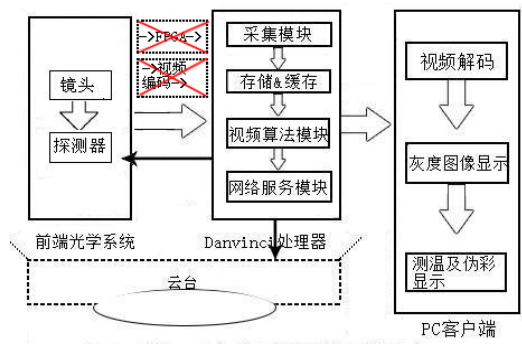


图 2 基于 Davinci 的红外热像仪系统总体架构
Fig.2 Infrared Thermal Imager System Based on Davinci

3 系统模块设计与实现

3.1 探测器数字信号接口分析

Tau 机芯提供 3 数字信号接口^[15]: LVDS (串行 14 bit)、BT-656 (并行 8 bit)、CMOS (并行 14 bit), 其中 LVDS 是为兼容上一代 Photon 系列而保留, 如果使用 LVDS 就必须用 FPGA 进行电平转换和串并转换, 并组帧成 BT656 视频格式, 目前红外热像产品都是这种方案, 其弊端是引入 FGPA 增加了开发难度、产品开发周期和成本, 同时也增加了故障率; 市面上安防监控方案和达芬奇开发板, 视频源均是使用模拟信号, 经视频编码芯片转换成 BT656 格式再接入 DSP, 这类监控方案最多只能用于红外监控^[21], 不宜用于红外热成像测温。

3.2 Davinci 视频前端接口分析及信号驳接

Davinci 视频处理系统 (Videio Process Sub System-VPSS), 分视频前端 (Videio Process Front Endpoint-VPFE) 与视频后端 (Videio Process Back Endpoint-VPBE), VPFE 负责摄像头、视频解码器等外围图像传感器接口, 及图像预处理等, VPBE 负责视频显示、OSD 字幕等; VPFE 中的 CCDC (Charge Coupled Device Control-CCDC) 负责接受 RAW 格式 (无压缩) 图像数据, 和来自 CMOS 或 CCD 的视频数据, 表 1 列出了 CCDC 接口的引脚多路复用模式。经观察与分析, 当 CCDC 处于第 2 列 (PRGB 模式)

时, 且 TAU 设置为 CMOS 14 bit 格式输出时, 视频数据便可由 Tau (3.3 V TTL) 经 SN74AVC8T245PWR 进行电平转换后便可正确地接入 Davinci (TTL 1.8 V), 无须用诸如 TVP5158、ADV7180 视频解码类的芯片, 也无须用 FPGA 进行串并转换和复杂的视频数据组帧。

3.3 存储模块及系统引导过程

Danvinci 优秀的数字视频处理功能, 需要一种大容量的高速内存, 系统采用 2 片共 64 M×16 b 的 DDR2 SDRAM 来运行程序和缓存频数据, 每个像素点占 2 个字节, 因为精度是 14 bit, 故高字节的高两位 0; 一片 128 M×8 b 的 NandFLASH 存储系统文件 and 应用程序, 红外图像的压缩等处理均是在 DDR2 内部完成的。当 BTSEL[1:0]=11 时, 可以从 UART 烧写 ubl 文件, 再设置 BTSEL[1:0]=00 后, 系统从 Nand 读取 ubl 并运行, 而后可以通过以太网烧写 uboot、内核及文件系统, 完成所有文件的烧写后, 系统可以直接从 NandFlash 读取文件, 加载运行并启动。此启动流程, 和以前的嵌入式系统相比, Nor Flash 和仿真器 (或烧写器) 不是必备的, 可以理所当然的去掉它, 故本方案显得精简。

表 1 视频前端图像接口模式的信号定义

Table 1 Signals for VPFE imager interface modes				
Pin name	PRGB	YCC16	YCC8	REC656
PCLK	PCLK	PCLK	PCLK	PCLK
VD	VD	VD	VD	-
HD	HD	HD	HD	-
CI7	D[15]	CI[7]/YI[7]	Y7,Cb7,Cr7	-
CI6	D[14]	CI[6]/YI[6]	Y6,Cb6,Cr6	-
CI5	D[13]	CI[5]/YI[5]	Y5,Cb5,Cr5	-
CI4	D[12]	CI[4]/YI[4]	Y4,Cb4,Cr4	-
CI3	D[11]	CI[3]/YI[3]	Y3,Cb3,Cr3	-
CI2	D[10]	CI[2]/YI[2]	Y2,Cb2,Cr2	-
CI1	D[9]	CI[1]/YI[1]	Y1,Cb1,Cr1	Y9,Cb9,Cr9
CI0	D[8]	CI[0]/YI[0]	Y0,Cb0,Cr0	Y8,Cb8,Cr8
YI7	D[7]	YI[7]/CI[7]	Y7,Cb7,Cr7	Y7,Cb7,Cr7
YI6	D[6]	YI[6]/CI[6]	Y6,Cb6,Cr6	Y6,Cb6,Cr6
YI5	D[5]	YI[5]/CI[5]	Y5,Cb5,Cr5	Y5,Cb5,Cr5
YI4	D[4]	YI[4]/CI[4]	Y4,Cb4,Cr4	Y4,Cb4,Cr4
YI3	D[3]	YI[3]/CI[3]	Y3,Cb3,Cr3	Y3,Cb3,Cr3
YI2	D[2]	YI[2]/CI[2]	Y2,Cb2,Cr2	Y2,Cb2,Cr2
YI1	D[1]	YI[1]/CI[1]	Y1,Cb1,Cr1	Y1,Cb1,Cr1
YI0	D[0]	YI[0]/CI[0]	Y0,Cb0,Cr0	Y0,Cb0,Cr0
GPI01	C_WE	C_WE	C_WE	-
GPI04	C_FIELD	C_FIELD	C_FIELD	-

1)FLASH: 本系统采用 128 M×8 b 的 K9F1G08, DM6446 通过 EM_CS[n], EM_OE, EM_WE 分别控制 NandFLASH 的片选信号、读使能和写使能, 其与

DM6446 的连接如图 3 所示。

2) DDR2: 由于在整个图像处理过程中需要缓存大量的图像数据, 而 DM6446 芯片内部只集成了 256 KB 的 SRAM, 显然不能满足需求, TMS320DM6446 外挂 2 片 DDR2 SDRAM 来扩展存储空间, 保证了系统实时运行时, 图像的缓存功能。DDR2 采用 64 M×16b 容量的 H5PS1G63EFR, 拼接成 32 bit 位宽后接入数据总线, 连接图如图 4 所示。

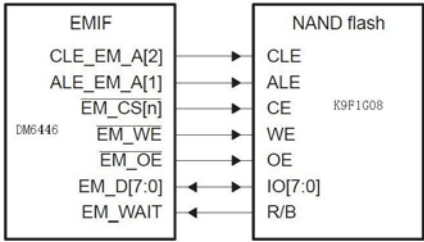


图 3 扩展存储器与 NandFlash 之间的接口

Fig.3 The interface between extended memory and NandFlash

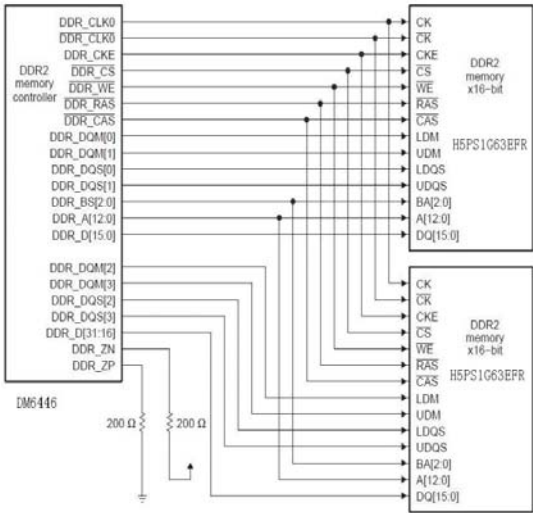


图 4 DDR2 存储器的 32 bit 连接方式

Fig.4 DDR2 memory 32 bit connection

3.4 网络传输模块

TMS320DM6446 的网络通信接口由 MDIO (Management Data Input/Output) 模块+EMAC 模块+EMAC (Ethernet Media Access Controller) 控制模块共 3 部分组成。

本系统设计时采用 MICREL 公司的 KSZ8041NL 作为 10/100Base-TX 以太网收发器, 与 DM6446 连接如图 5 所示, 当然也可以换成 DM9000 或 CS8900, 驱动总体框架不变, 只需修改相应的配置字。

3.5 软件模块规划

本系统的软件开发环境: 虚拟机操作系统为 Ubuntu10.04, 达芬奇操作系统为 MontaVista Linux 1.20, 开发包为 DvSDK_2_00_00_22。软件部分主要划分了 4 个服务: 图像采集、视频算法、网络传输 (RTP

组包及 RTSP 控制)、通信控制消息。图像采集原是针对模拟复合视频输入, 其驱动程序需重新开发, 以适应现在的 CCD 接口且格式为 raw data; 视频算法, 主要是做中值滤波去椒盐噪声和非均匀性校正, 然后压缩成 H.264 视频; RTP 线程, 将前面已编码后的 H.264 视频流, 也就是一个个的 NALU 单元, 按照 RFC3984 标准中规定的格式把 NALU 单元封装成 RTP 包发送给客户端; RTSP 是流媒体控制协议, 用于实时控制数据的传输, 如播放、暂停、快进、快退等操作, RTSP 只传输控制信息, 但并不传输流媒体数据, RTSP 服务启动后, 就会一直监听 554 端口, 等待客户端连接, 在连接建立成功后就开始传送 RTP 包。此外缓存机制也很重要, 是上述 4 个服务运行的保障, 系统用了 2 个帧缓冲, 一个用来向视频驱动获取原始图像数据, 另一个向服务器发组帧后视频流, 2 种缓冲帧是分开

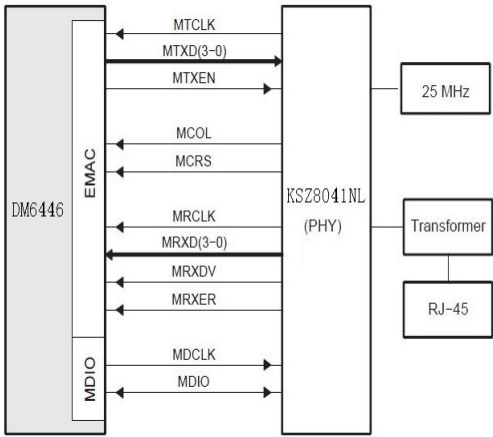


图 5 以太网接口典型的配置图

Fig.5 Ethernet interface typical configuration diagram

3.6 视频算法处理

H.264 和 RTP/RTSP 有现成的固件可以移植, 视频处理需借助 OpenCV (Open Source Computer Vision Library) 的嵌入式版本——emCV (Embedded Computer Vision Library), 原始的红外热图不能直接使用, 需经过预处理, 典型的要去椒盐噪声和非均匀校正。中值滤波 (库函数 media_filter) 对椒盐噪声最为有效, 直接调用效率不高, 根据函数原来的算法思想, 利用 C64X+DSP 指令及寄存器优化后速度能提高 1~2 个数量级。

两点校正法是针对非均匀校正最为成熟的算法之一, OpenCV 和 EMCV 中没有两点校正算法库函数, 需自行编写。应用两点法校正有 2 个前提, 一是探测器的响应在温度测量范围内呈线性, 二是探测器的响应具有时间稳定性并且受随机噪声的影响较小, 满足此前提的探测器在均匀辐射背景下的响应表示为:

$$X_{ij}(\phi) = U_{ij}\phi + V_{ij} \quad (1)$$

式中: ϕ 为辐射通量; U_{ij} 为坐标 (i, j) 像元的增益; V_{ij} 坐标 (i, j) 像元的偏移量。对于每一单元, U_{ij} 和 V_{ij} 的值是固定且不随时间变化, 由于探测器各阵列单元响应的不一致, 导致在同一辐射通量 ϕ 下各 $X_{ij}(\phi)$ 存在差异, 根据两点法的使用前提假定校正模型为:

$$Y_{ij} = a_{ij}X_{ij}(\phi) + b_{ij} \quad (2)$$

式中: a_{ij} 为校正增益; b_{ij} 为校正偏移量; Y_{ij} 为校正后输出。校正方法如下: 黑体在低温 T_L 时遮住镜头, 测得探测器所有像元平均响应 $Y_L = a_{ij}\bar{X}_{ij}(\phi_L) + b_{ij}$, 其中 $\bar{X}_{ij}(\phi_L)$ 为在 T_L 时像元 (i, j) 所在帧图像数据的平均值; 黑体在探测器量程的上限高温 T_H 时(均匀温度源, 如黑体), 测得探测器所有像元平均响应 $Y_H = a_{ij}\bar{X}_{ij}(\phi_H) + b_{ij}$, 其中 $\bar{X}_{ij}(\phi_H)$ 为在 T_H 时像元 (i, j) 所在帧图像数据的平均值; 经计算易得校正系数:

$$a_{ij} = \frac{Y_H - Y_L}{\bar{X}_{ij}(\phi_H) - \bar{X}_{ij}(\phi_L)} \quad (3)$$

$$b_{ij} = Y_H - a_{ij}\bar{X}_{ij}(\phi_H) \quad (4)$$

将系数 a_{ij} 、 b_{ij} 代入公式(2)即可进行校正, 在DM6446中, 宜将 a_{ij} 和 b_{ij} 存放文件中, 系统启动时, 读进矩阵中, 再调用emCV的矩阵运算, 能显著提高运算速度。

4 红外热图显示的设计

H.264 码流用一般的流媒体播放工具如 VLC 或 Realplay 就能观看, 如果分配公网 IP 地址后(默认端口号 554), 就可以从能连 internet 网的任意 PC 上实现远程访问。红外热图 Raw 格式解析是基于 Windows 环境下 VC++ 6.0 的 MFC 设计的, 主要负责接收并解析 Danvinci 发送来的 16bit (低 14bit 有效) 红外图像数据包, 目前普通显示器解析精度只有 24 bit/3=8 bit, 因此对于 14 bit 的灰度图像不能直接显示, 线性映射法^[22]能将原图像的灰度相对均匀地映射到显示图像, 其变换函数如下:

$$G_n = \begin{cases} 0; & G_0 \leq G_b \\ 255; & G_0 \geq 256/R \\ \text{int}[(G_0 - G_b) * R]; & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

式中: G_0 是检测图像的原始灰度; G_n 是变换后的显示灰度; G_b 是显示基线; R 是映射因子。在实际操作中, G_b 和 R 通过设置固定值或者手动调节获得, 根据本系统的特点 $R=256/N$, $N=2^{14}$ 。

在显示器上显示时灰度需转成 RGB 颜色模式,

在 RGB 模型中, 如果 $R=G=B$ 时, 则彩色表示一种灰度颜色^[23], 灰度图像显示就是反向利用这个原理, 主要代码为:

```
a. 遍历图像矩阵求出灰度最大值 minbrightness 与最小值 maxbrightness.
b. for (i=minbrightness;i<=maxbrightness;i++)
    { //均衡化
      wwnew[i]=(int)((i-minbrightness)*256/
        (maxbrightness-minbrightness)); }
c.for(j=0;j<IMAGE_HEIGHT;j++)//灰度图像显示
{   for(i=0;i<IMAGE_WIDTH;i++)
    {   WB=j*withBytes; //一行的字节数 320*3
        IB=i*mbpp;      //3, 每个点三个字节
        r_sum=(int)(pBuf[j*IMAGE_WIDTH+i]);
        if (r_sum<=minbrightness)
        {   yuantu.SetPixelRGB(i,j,0,0,0); }
        else if (r_sum>=maxbrightness)
        {   yuantu.SetPixelRGB(i,j,255,255,255); }
        else
        {   new_gray=wwnew[r_sum];
            //取对应 8bit 空间值
            pYuantuData[WB+IB]=new_gray;
            //B 分量
            pYuantuData[WB+IB+1]=new_gray;
            //G 分量
            pYuantuData[WB+IB+2]=new_gray;
            //R 分量   }   } }
```

同时集成了图像拍照(raw 或 jpg), 用 Opencv 插件实现 avi 录像的功能。

由于人眼对灰度级分辨率不是很敏感, 黑白图像或图像的转换颜色可以增强人对不同的回波强度的灵敏度^[24], 从主观上增加了显示信号的动态范围, 增强图像边界的可识别程度, 为便于肉眼观察红外热图效果, 提供了 12 种伪彩模式供选择。

5 系统测试及评价

图像质量普适的客观评价标准是图形图像领域长期以来, 至今尚未完全解决的难题。红外热图质量客观评价也如此, 已知的清晰度评价函数^[25]均缺乏对图像的绝对清晰进行评价的能力, 即无法完全独立于图像内容之外评价其在清晰度标准下的绝对质量, 本论文的重点是保真地还原探测器所输出的热图数据。鉴于此, 设计如下对比测试方案:

1) 保持光学前端部分完全一样, 即同一镜头同一探测器, 在测试模式下(播放 Flir 商标, 以保证输

出完全一致的内容),先用 Flir 原装适配器拍摄得 Test1.raw,再用本文设计的 Danvinci 处理器拍摄得 Test2.raw,用 winmerge2.14 工具比较 Test1.raw 和 Test2.raw,文件完全一致,证明本文的方案可以完全替代 Flir 原装装置(SIPO accessory module)。

2)定试验:用标准黑体,把3次灰度均值与对应温度值列出如表2所示。

表2 标定时温度与对应的灰度表

Table 2 Shows the calibration temperature and the corresponding gray scale table

灰度值 H	5104	6384	7868	9560	11381	13466
黑体温度/ $^{\circ}\text{C}$	40	60	80	100	120	140

用红外标定工具 Prism5.0 进行分析,得拟合曲线如图6及其拟合方程:

$$T = -104.7 + 0.04506H - 4.527e^{-6}H^2 + 2.809e^{-10}H^3 - 6.908e^{-15}H^4$$

(6)

由图6观察,灰度对温度的响应在小范围内近似线性,响应曲线良好,根据标定后的方程(6)就可以对目标物体进行测温了。

标定完成后,图7为电解铝槽的红外热图效果,右侧为产品化后的设备实物,视场范围内最高温度为101 $^{\circ}\text{C}$,为设备诊断提供参考数据。

由本方案试产出的样机主要参数为:

探测器类型:非制冷焦平面(FPA)

工作波段:8~14 μm

成像分辨率:640(H)×480(V)

焦距:35 mm (F1.25)

测温范围(无衰减片):−20 $^{\circ}\text{C}$ ~+600 $^{\circ}\text{C}$

NETD: 50 mK (F1,30 $^{\circ}\text{C}$)

视场角(H×V):18 $^{\circ}$ ×14 $^{\circ}$

帧率:25 pf/s

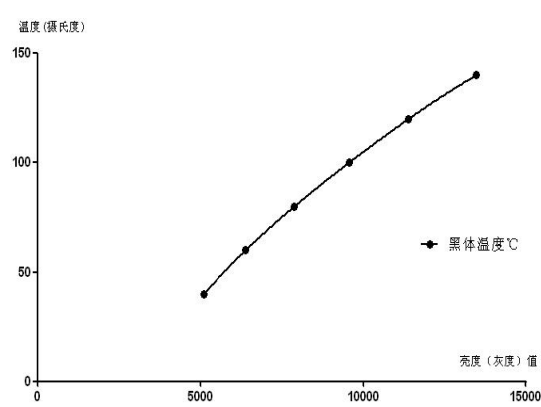


图6 亮度与灰度 Fig.6 Brightness and Grayscale

6 结论

以工程应用为目的的是本文的初衷,中途否定了5种不可行的设计方案,前后经历近3年乃成,经得起实践检验。虽然目前探测器的精度最多只14 bit,本方案却具有16 bit 精度的处理能力,能在将来与16 bit 的探测器很好地匹配。与常规方案相比,ARM+DSP 双核处理器保证了高性价比,去掉了烦琐的FPGA 电平转换与串并转换,无需视频编码芯片生成数字视频信号,避免了A/D 衰减从而提高了信号质量,也无需仿真器或烧写器进行辅助开发,两相比较使方案整体显得简洁、低成本、体积更小;将图像处理算法在设备中实现,既体现了功能内聚也很好的保护了知识产权;产品化后可直接用于工业测温,当然也可用于农业,如粮库测温、森林防火监控及其它科研实验。方案下一步待改进的环节是实现无线透传彻底不用布线,开发适合红外图像的稀疏压缩算法后再传输以节省带宽,移植到具有H.264 硬编码的DM6467T,以及用智能手机实现移动监测。

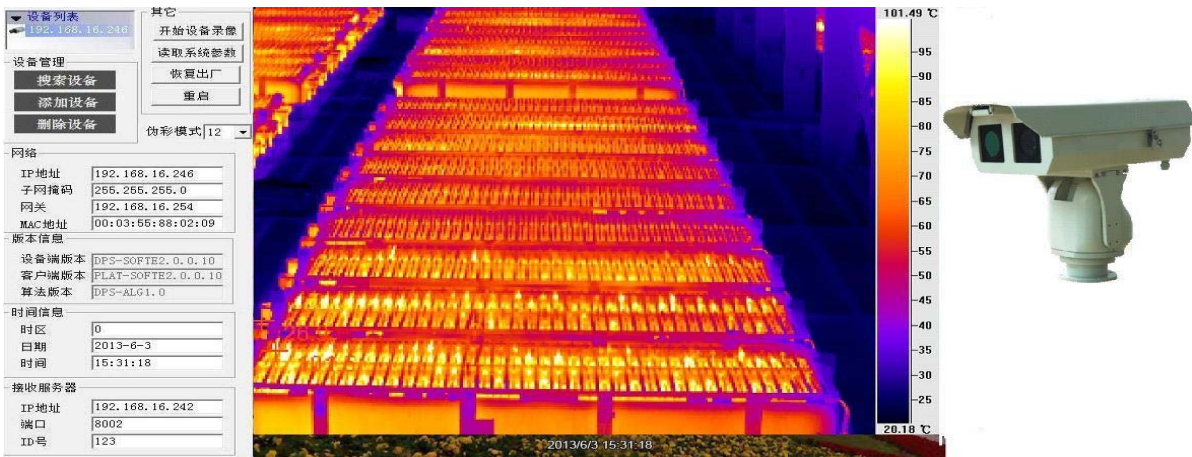


图7 电解槽测温效果 Fig.7 Effect of temperature measurement in electrolyzer

参考文献:

- [1] 李俊山, 杨威, 张雄美. 红外图像处理、分析与融合[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 11-13.
LI Junshan, YANG Wei, ZHANG Xiongmei. *Infrared Image Processing, Analysis and Fusion*[M]. Beijing: Science Press, 2009: 11-13.
- [2] 常本康, 蔡毅. 红外成像阵列与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 8.
CHANG Benkang, CAI Yi. *Array and infrared imaging system*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 8.
- [3] 陆婉珍, 袁洪福. 当代中国近红外光谱技术全国第一届近红外光谱学术会议论文集[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
LU Wanzhen, YUAN Hongfu. *China's Near-Infrared Spectroscopy First National Conference on Near - Infrared Spectroscopy*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2006.
- [4] 徐小龙, 蒋焕煜, 杭月兰. 热红外成像用于番茄花叶病早期检测的研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 145-149.
XU Xiaolong, JIANG Huanyu, HANG Yuelan. Study on detection of tomato mosaic disease at early stage based on infrared thermal imaging[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(5): 145-149.
- [5] 周建民, 刘娟娟, 舒丽丽. 苹果表面缺陷红外热成像检测装置及处理方法[J]. 中国农机化, 2012(2): 113-115.
ZHOU Jianmin, LIU Juanjuan, SHU Lili. Device and method of infrared thermography in surface quality detection of apples[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(2): 113-115, 120.
- [6] 黄树青, 顾卫, 袁帅, 等. 半干旱地区工程创面植被恢复的温度效应研究[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 105-112.
HUANG Shuqing, GU Wei, YUAN Shuai, et al. A study on vegetation restoration and its effect in surface temperature on slopes destroyed by engineering in semi-arid areas[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 105-112.
- [7] 姜艳丰, 王炜, 梁存柱, 等. 红外测温仪及其群落冠层温度测定上的应用[J]. 内蒙古科技与经济, 2007, 10(140): 119-120.
JIANG Yanfeng, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al. Application of Infrared Thermometer and Its Canopy Temperature[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2007, 10(140): 119-120.
- [8] 王茹香, 高迟, 薛祥坤. 基于 AT89S52 单片机的果园红外测温系统设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 115-119.
Wang Ruxiang, GAO Chi, XUE Xiang-kun. Design of Orchard Infrared Temperature Measurement System Based on AT89S52 Single-chip Microcomputer[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(9): 115-119.
- [9] 郑艺华, 王芳芳, 许学勤, 等. 检测有机磷农药残留生物传感器的温度特性[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 132-135.
ZHENG Yihua, WANG Fangfang, XU Xueqin, et al. Temperature property of thermal biosensor used in organophosphorous pesticide detection[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(1): 132-135.
- [10] 丁鲲, 邵鲁涛. 基于单片机的温室大棚红外测温系统[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(25): 15824-15825.
DING Kun, GAO Luta. Infrared Temperature Measurement System Based on MCU Used in Greenhouse[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(25): 15824-15825.
- [11] 赵正辉. 基于 ARM+FPGA 的红外热像仪的研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2010.
ZHAO Zhenghui. Study of infrared thermal imager based on ARM+FPGA[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2010.
- [12] 王勇. 基于 ARM9 红外热像仪的设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
WANG Yong. Design and Implementation of Infrared Thermal Imager Based on ARM9[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [13] 吴华, 谢礼莹, 徐泽宇. 基于 ARM9 的红外热像仪设计与实现[J]. 计算机工程, 2010, 36(16): 234-236.
WU Huang, XI Liying, XU Zuyu. Design and implementation of Thermal Infrared Camera Based on ARM9[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(16): 234-236.
- [14] 曾庆永, 郑世峰. 基于 DSP 处理器的红外测温系统的设计[J]. 光电与控制, 2012, 19(7): 85-88.
ZENG Qingyong, ZHENG Shifeng. Design of an Infrared Temperature Measurement System Based on DSP Processor[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(7): 85-88.
- [15] 孙帅, 杨星. 红外热像在线测温系统的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2009, 20: 212-215.
SUN Shuai, YANG Xing. Design and implementation of Infrared Imaging On-Line Thermal Measurement System[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, 20: 212-215.
- [16] Texa instruments. TMS320DM644x DMSoC Video Processing Front End VPFE.pdf[EB/OL]. [2010-15-28], [2016-08-19]. <http://www.ti.com>. Literature Number: SPRUE38H.
- [17] Texa instruments. TMS320DM644x DMSoC Asynchronous External Memory Interface (EMIF).pdf[EB/OL]. [2016-08-19]. <http://www.ti.com>. Literature Number: SPRUE20.
- [18] Texa instruments. TMS320DM644x DMSoC DDR2 Memory Controller[EB/OL]. [2016-08-19]. <http://www.ti.com>. Literature Number: SPRUE22.
- [19] Texa instruments. TMS320DM644x DMSoC Ethernet Media Access Controller (EMAC)/Management Data Input/Output (MDIO)[EB/OL]. [2016-08-19]. <http://www.ti.com>. Literature Number: SPRUE24.
- [20] Flir. Tau 320 User's Manual.pdf[EB/OL]. [2016-08-19]. Version: 120. <http://www.flir.com>. Document Number: TAU-0035-00-10.
- [21] 唐鸾, 程建新, 吴海京. 基于 TMS320DM642 的红外监控系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2013, 36(2): 57-59.
TANG Luan, CHENG Jianxin, WU Haijing. Design and implementation of the infrared monitoring system based on TMS320DM642[J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, 36(2): 57-59.
- [22] 陈炼, 吴志芳, 王凯. 辐射成像系统图像灰度的自适应显示方法[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(5): 902-905.
CHEN Lian, WU Zhifang, WANG Kai. Adaptive Display of Radiation Inspection Image[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(5): 902-905.
- [23] Baike. Gray processing[EB/OL]. [2016-08-19]. <http://baike.baidu.com/view/3701940.htm>
- [24] Gary Bradski, Adrian Kaebler. *Learning OpenCV*[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2009.
- [25] 陈亮, 李卫军, 覃鸿, 等. 数字图像清晰度评价函数的通用评价能力研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(14): 152-155.
CHEN Liang, LING Weijun, QIN Hong, et al. Efficiency contrast of digital image definition functions for general evaluation[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(14): 152-155.