

〈图像处理与仿真〉

一种红外数字图像伪彩色显示设计

樊晓清, 顾国华, 刘 宁, 隋修宝

(南京理工大学 光电工程国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

摘要: 利用红外热成像系统可以将物体的热分布转化成可视图像, 并在监视器上以灰度级的形式显示出来, 进而得到被测物体的温度分布场。由于人眼对彩色的分辨能力高于黑白图像, 所以对红外热图像进行伪彩色编码更利于人眼识别和获取图像中的有用信息。基于FPGA和ADV7127, 提出了一种伪彩显示方法, 对来自红外热像仪输出的数字图像按照PAL制标准进行视频编码, 并对数据进行彩虹编码或者重金属编码等处理, 经过AD转换将编码后的数字图像转化为彩色PAL制模拟信号并由电视机进行显示。所实现的红外图像伪彩显示设计具有低功耗, 灵活性强, 便于系统小型化等特点。

关键词: 红外图像; FPGA; ADV7127; 伪彩色; PAL制

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)07-0398-06

Design of Pseudo-color Coding and Display for Infrared Digital Images

FAN Xiao-qing, GU Guo-hua, LIU Ning, SUI Xiu-bao

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The thermal distribution of objects can be transformed into the visual pictures by the infrared thermal imaging system and displayed on the monitor in grey level or pseudo-color, thus the temperature distribution of objects can be obtained. As the resolving power of the human eye to color image is higher than to monochrome image. Pseudo-color-coded infrared thermal image is more conducive to human eye to identify and obtain useful information in the image. According to the thermal imaging principle of temperature measurement and the characteristics of infrared images, the pseudo-color coding of infrared image is studied in this paper. The pseudo-color coding is based on FPGA and ADV7127 and the standard of the video coding must fit with the PAL system. After processing of Rainbow coding or heavy metals coding, the coding image with color will be showed on the monitor. The infrared thermal imaging pseudo-color system designed in the paper has low power consumption, more flexibility, system miniaturization characteristics.

Key words: infrared thermal image, FPGA, ADV7127, pseudo-color, PAL

0 引言

热成像测温系统所产生的红外图像为黑白灰度级图像, 灰度值动态范围不大, 人眼很难从这些灰度级中获得丰富的信息^[1]。一般来说, 人眼可识别的灰度信息大约在50个灰度级左右, 远远小于对彩色信息的辨识和敏感度, 因此, 将灰度变化范围非

常窄的细节灰度信息以彩色化的形式进行表现, 会大大增强人眼对图像细节的发现和理解。鉴于人眼的彩色敏感细胞能分辨出几千种彩色色调和亮度, 但对黑白灰度级却不敏感的特性, 为了更直观地增强显示图像的层次, 提高人眼分辨能力, 对系统所摄取的图像进行伪彩色处理, 从而达到图像增强的效果, 使图像信息更加丰富^[2]。红外图像的伪彩色

收稿日期: 2013-04-09; 修订日期: 2013-05-06.

作者简介: 樊晓清 (1988-), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 主要从事红外图像处理算法的研究工作。

基金项目: 江苏省自然科学基金, 编号: BK2011698; 教育部博士点新教师基金, 编号: 20113219120017; 南京理工大学自主科研专项计划资助项目, 编号: 2011XQTR01; 南京理工大学自主科研专项计划资助项目, 编号: 2011YBXM74。

实现主要包含伪彩色编码和伪彩色显示 2 个部分。

伪彩色编码的方法很多,一般来说分为感知色彩空间编码、彩虹编码以及热金属编码等。本文在彩虹编码的基础上对伪彩编码进行研究。传统的灰度级伪彩色变换是将图像分为 4 个部分:低温物体(蓝色),中低温物体(绿色),中温物体(黄色)和高温物体(红色),各区域的灰度范围取固定值^[3]。当红外图像从简单的场景变换到复杂的场景时,细节信息增多,这个时候将图像分为 4 个部分已经不能较好地表现丰富的图像细节信息。本文提出一种改进的彩虹编码方法,可以使图像根据细节信息的丰富程度,自适应的划分所显示的伪彩色层次,最多可分为 7 种主要的颜色层次进行显示,即按照红、橙、黄、绿、青、蓝、紫色顺序编码。

传统的红外图像显示格式有 PAL 制式和 VGA 制式 2 种。一般的红外图像显示方案设计都是采用专用的视频显示芯片(如 ADV7123, ADV7170 等),由图像处理芯片(FPGA 或者 DSP)按照显示芯片所需输入信号格式产生数字视频信号,由专用的视频芯片转换成监视器能够识别的模拟视频信号^[4]。专用视频芯片往往需要较多的信号输入管脚(比如 ADV7123 芯片需要输入 R、G、B 三路数字视频信号),会占据电路板较大面积,布线也更复杂,价格昂贵,不利于系统小型化。ADV7127 是一款高速的 AD 转换芯片,基于 FPGA 和 ADV7127,本文提出了一种实用的红外伪彩色显示技术,在 FPGA 内部完成红外图像伪彩色编码以及标准 PAL 制式视频彩色编码,实现红外图像的伪彩色显示。传统的图像显示一般需要缓存一帧图像,采用乒乓处理的方式显示图像^[5],本文设计的显示方法巧妙利用了 PAL 制隔行显示的特点,不需要使用外部存储器,只需在 FPGA 内部 FIFO 中缓存几行图像数据就实现了伪彩色红外图像的实时显示。

1 伪彩显示系统构成

红外图像表征的是被测目标的温度分布,是灰度图像,对人眼而言分辨力较低,又由于景物热平衡、波长较长、传输距离远、大气衰减等原因,造成红外图像空间相关性强、对比度低。外界环境的随机干扰和热成像系统的不完善,还会给红外图像带来多种多样的噪声,造成红外图像信噪比要低于一般的可见光图像^[6]。红外探测器各探测单元的响应特性不一致、光机扫描系统缺陷等原因,往往造成红外图像的非均匀性,体现为图像的固定图案噪声、串扰、畸变等^[7]。红外图像的这些特点决定了红外图像需要经过一系列复杂的图像预处理算法才能输出至监视器进行显示。这些算法主要包括红外图像的非均匀性校正、直方图均衡化处理、盲元补偿、图像去噪以及红外图像数字细节增强(DDE)等^[8]。

图 1 是系统功能框图。UFPA 采用法国 ULIS 320 × 240 红外探测器,响应的光谱波长范围为 8~12 μm。由驱动电路对红外探测器进行合理的参数配置后,探测器芯片输出模拟信号,经过 AD 采样,可以得到帧频 50 Hz, 14 bit 灰度,图像大小为 320 × 240 的原始红外图像数据。原始红外图像数据在 FPGA 中经过一系列的实时图像预算法处理,帧频不变,位宽压缩到 10 bit。处理后的灰度图像数据需要经过伪彩色编码模块实现灰度-彩色转换,再由彩色 PAL 制数字视频编码模块进行数字视频格式转换获得符合彩色 PAL 制标准的数字图像信号。系统采用的是 Altera 公司的 Cyclone 系列 EP3C80F780I7 FPGA 芯片,其包含 81264 个 LE, 343 kB 片上静态 SRAM 存储器, 488 个硬件乘法器等资源。丰富的逻辑资源保证了伪彩显示系统可以在单片 FPGA 上完成设计。ADV7127 是一款高速视频 DAC 芯片,

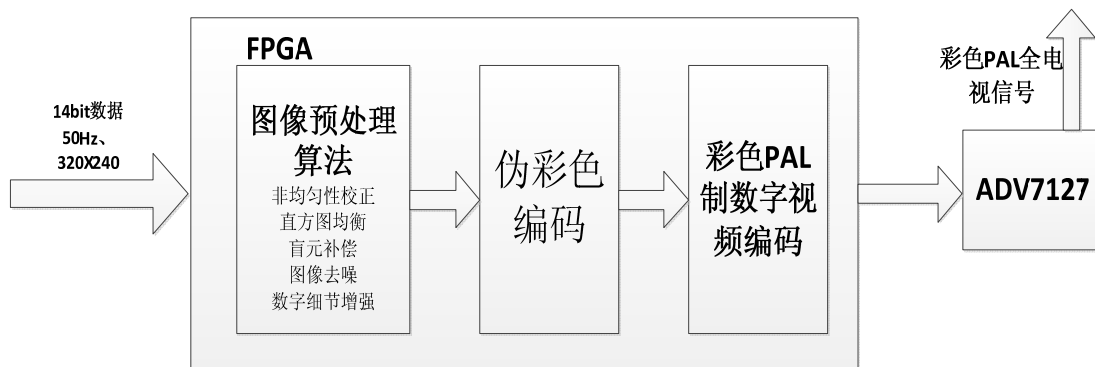


图 1 红外图像处理系统功能框图

Fig.1 Schematic diagram of the infrared image system

该芯片只包含一路视频输入通道, 转换精度为 10 bit, 数据吞吐量可达 240 MSPS。

2 红外图像的彩色化处理

红外图像的伪彩色处理方法主要有 3 种: 密度分层法、灰度级-彩色变换和频域滤波法。最简单和常用的方法是图像的灰度伪彩色处理, 即将每个灰度级分别对应到不同的颜色上, 实现图像灰度的彩色映射。根据色度学原理, 任何一种颜色都是由红、绿、蓝 3 种基色按照不同的比例合成, 因此需要人为划定不同灰度级范围所对应的三基色比例成分^[7]。伪彩色的处理过程就是构造(1)式的映射关系。

$$\begin{aligned} R(x, y) &= J_R[g(x, y)] \\ G(x, y) &= J_G[g(x, y)] \\ B(x, y) &= J_B[g(x, y)] \\ (R, G, B) &= (R(x, y), G(x, y), B(x, y)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $g(x, y)$ 是像素在 (x, y) 处的灰度值; $J_R[g(x, y)]$ 、 $J_G[g(x, y)]$ 、 $J_B[g(x, y)]$ 是三基色变换函数; $R(x, y)$ 、 $G(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 为变换后的三基色强度。将三基色强度信号分别送到 3 个独立的通道进行处理, 再进行合成, 就可以得到一幅色调连续变化的彩色图像。常用的灰度级彩色变换方法有彩虹编码和热金属编码。两种编码方法的不同在于构造不同的彩色映射函数, 以获得不同的彩色显示效果。针对室温下情况, 本文使用彩虹编码实现伪彩色显示, 并在传统彩虹编码的基础上进行改进, 提出并实现了一种色彩层次可根据场景自适应调整的彩色编码算法。

2.1 伪彩色算法比较与分析

对红外图像进行伪彩色处理的目的是为了更适应人眼的观察和分析。传统的伪彩色处理算法一般用三基色在各个温度段形成混叠, 按照图像灰度值从高到低进行温度映射, 这种处理方法往往导致整幅图像颜色比较均匀, 高温区域缓慢向低温区域过渡, 人眼观察比较舒适, 但是不利于区分人眼感兴趣的目标。

在密度分层法中, 一般是人为地将灰度分为 n 层, 每层用一种颜色来表示, 这种方法的一个显著缺点是 n 取值太小无法有效区分图像细节, n 取值过大又会导致运算复杂、算法效率降低^[9]。对于灰度级-彩色变换方法, 由(1)式可知是分别建立红、绿、蓝 3 个不同的变换函数, 再将三路变换结果合并输出伪彩色图像, 传统的灰度级-彩色变换方法是按照灰度级从高到低, 固定地将红外图像划分为几个区域(高温、中温、低温), 图像色彩层次分明, 但是不能有效区分目标图像和背景图像。频域滤波法由

于是在频域进行伪彩色处理, 算法复杂度高, 一般很难在硬件电路中实现。

上述传统伪彩处理算法的一个共同点是图像彩色区域都是基于人为主观划分或者根据一般经验决定, 不具有自适应性。在某种场景或者灰度分布范围内, 选定的算法可能有比较好的伪彩处理效果, 但是换一种场景效果会变得很差。为了有效解决这一问题, 基于输入图像的统计特征, 我们提出一种自适应地伪彩色变换算法, 以适应人眼对目标的区分。该方法基于红外图像的直方图统计信息, 将红外图像的高温区域和低温区域有效分离。通过调整红外图像的直方图, 可以有效拉伸红外图像的前景和背景的灰度范围。红外图像的背景区域一般是低温区域, 对应的彩色映射函数尽量设计在紫色和蓝色区域; 红外图像的目标区域一般属于高温区域, 结合人眼对色彩的敏感程度, 中温区域段的彩色函数以绿色为主, 高温敏感段偏红色和橙色。通过这种处理方式得到的红外图像, 对于低温区域形成了很好的背景压缩, 中温区到高温区形成了很好温度差异和渐变变换, 将微小的温度细节都凸显出来, 提高了图像的对比度和层次感, 具有十分良好的效果。

基于密度分层法和灰度级-彩色变换法这 2 种伪彩处理方法, 本文提出一种自适应的伪彩编码方法。传统灰度级-彩色变换方法的温度分段区域是固定不变的, 因此面对不同的场景适应能力有限。基于红外图像的直方图分布特征信息, 本文提出一种可以自适应改变图像的灰度分段区域个数, 使彩色映射函数随着不同的场景不同的灰度范围可以自行调整的伪彩色处理算法。

2.2 自适应伪彩编码原理

在 $x_{\min} \sim x_{\max}$ 的灰度范围内, 假定需要划分 n 个温度区域, 每个温度区域对应的灰度级范围是 $(x_{\min} \sim x_{\max})/n$ 。每一段内的灰度映射函数分别设为 $f_1(x, y)$, $f_2(x, y)$, \dots , $f_n(x, y)$ 。

对于彩色 R 、 G 、 B 的一路通道, 其中:

$$J_R[g(x, y)] = f_m(x, y) \quad (2)$$

当像素在 (x, y) 处的灰度值 $g(x, y)$ 满足:

$$\begin{aligned} x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})(m-1)/n &\leq g(x, y) < \\ x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})m/n & \end{aligned} \quad (3)$$

由彩虹编码的相关基础可知, 每一段的映射函数均采用线性函数实现:

$$f_m(x, y) = a \cdot g(x, y) + b \quad (4)$$

在每个区间段, 函数 $f_m(x, y)$ 都经过至少 2 个区间端点, 分别是最低点 $(x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min})(m-1)/n$,

0)和最高点 $(x_{\min}+(x_{\max}-x_{\min})m/n,y_{\max})$,根据这两个点可以确定每段函数的斜率和截距参数值。注意到有的区间段变换后颜色分量或者为0或者为色度最大值(比如高温时显示为纯红色),此时取 $a=0,b=y_{\max}$ 或者 $a=0,b=0$ 即可。一般而言纯基色只会出现在灰度轴的两端或者正中间。

在实际场景中,不同的目标往往具有不同的细节信息。在细节信息较少的时候只用少数几种颜色就能很好的区分目标,此时颜色过多反而不利于突出重点目标;在物体细节信息丰富的时候,往往需要更多的颜色信息才能供人眼观察黑白情况下不易察觉的细节信息。这就意味着在面对复杂目标的时候,要求 n 的值要尽量大,而在一些普通应用场合只要求 n 有一个较小值即可。系统需要对采集的红外图像进行分析,智能的划分出显示图像所需的最佳颜色层次。

2.3 自适应伪彩编码实现方法

本算法实现的重点就是要能准确衡量一幅图像的细节信息大小。在观察分析图像时,人眼一般采取的是局部对比的方法,可以使用局部标准偏差、局部熵等指标衡量图像的细节信息丰富程度,反映图像的清晰程度。但是这两个指标都是适用于同类图像的对比,不适用于场景发生变化的情况。不论红外图像场景如何变化,红外图像的直方图反映的总是图像的灰度分布情况,因此本文用直方图信息作为图像的细节丰富程度的评判标准。

首先对红外图像进行直方图统计,得到每个灰度级所对应的像素个数占全部像素个数的比例 $P_r(r_i)$:

$$P_r(r_i) = \frac{\text{灰度值为}r\text{的像素个数}}{\text{一幅图像的像素总数}} \tag{5}$$

再计算上述 $P_r(r_i)$ 标准偏差 σ :

$$\sigma = (P_r(r_i) - \overline{P_r(r_i)})^2 \tag{6}$$

σ 越大,表明图像的灰度值波动越大,相应的

细节信息也就越丰富,对图像进行伪彩色处理就需要使用更多的颜色来表示,所取的 n 值也就越大,也就是需要将红外图像分成更多段进行伪彩色处理。

在算法硬件化处理时,不同 n 值对应的伪彩处理函数都预先固化在FPGA的ROM中,当 n 值发生变化时,FPGA内部图像选择模块会自动切换到不同的彩色映射函数模块中,完成对红外图像的伪彩色处理。

3 红外图像编码与显示

3.1 图像编码设计

如图2所示,红外灰度图像经过3个独立的彩色映射函数变换,得到 $R、G、B$ 三路伪彩图像信息。 $R、G、B$ 三基色信号经过一个矩阵运算电路,获得传输彩色电视的基本信号:亮度信号 Y 和两个色差信号 $U、V$ 。由公式(7)可知亮度信号和色差信号的关系。

$$\begin{aligned} Y &= 0.3R + 0.59G + 0.11B \\ U &= R - Y \\ V &= B - Y \end{aligned} \tag{7}$$

根据彩色电视机原理。若把色度信号 $U、V$ 直接与亮度信号 Y 混合,由于亮度信号和色度信号在时域和频域均有重叠,会出现严重的相互干扰。由于亮度信号的频谱具有间隙很大梳齿状特征,因而需要设法将色度信号插到亮度信号频谱的空隙中,实现“频谱交错”^[10],这样即可使色度信号不占有额外的频带,又可避免亮度、色度信号间的干扰。将色度信号分别通过一个 $U、V$ 平衡调幅器,就可以实现将色度信号“搬移”到亮度信号的频谱间隙中,其数学表达式如公式(8):

$$\begin{aligned} F_U &= U \sin \omega_{sc} t \\ F_V &= V \cos \omega_{sc} t \end{aligned} \tag{8}$$

PAL制标准要求在对色度信号采用正交平衡调

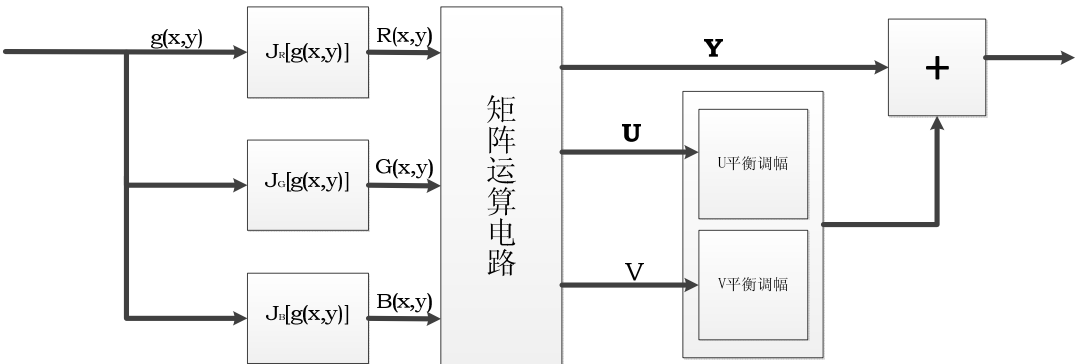


图2 图像编码模块结构图 Fig.2 Schematic diagram of Image encoding module

幅的基础上,对其中一个色度分量(F_V 分量)进行逐行倒相。最终的色度表达是公式(9)的形式。

$$F = F_U + F_V = U \sin \omega_{sc} t \pm V \cos \omega_{sc} t \quad (9)$$

U 、 V 两个色度矩阵的大小都是 320×240 , 像素时钟为 10 MHz 。在 FPGA 中,要实现对这两个矩阵信号的正交平衡调幅,一般采用正弦查找表的方式实现色度矩阵与一个正弦函数的乘法运算。 PAL 制标准要求副载频与整数行频有 $(1/4)f_H$ 的频差,称之为 $1/4$ 行间置,公式(10)给出了负载频与行频的关系。对于 PAL 制来说,行频 $f_H = 15625 \text{ Hz}$,场频 $f_V = 50 \text{ Hz}$,传送信号带宽为 6 MHz 。一般来说 f_{sc} 要求取得越高越好,要求大于亮度所占的 1.3 MHz 带宽,但是不能超过 6 MHz 的总带宽。

$$f_{sc} = (n - 1/4) f_H \quad (10)$$

在像素时钟为 10 MHz ,每行 320 个像素数据的条件下无法满足调制所需的采样点个数,为此需要对像素时钟进行倍频。考虑到视频 AD 转换芯片最大吞吐量为 240 MSPS ,取 n 为 200 ,得到 $f_{sc} = 3.12 \text{ MHz}$ 。所以需要对像素时钟进行 20 倍的倍频,倍频后的像素时钟为 200 MHz 。所以每行参与调制的像素为 $320 \times 200 = 6400$ 个,每个正弦波用 32 个数值进行采样表示,如此设计查找表可以满足 $f_{sc} = 3.12 \text{ MHz}$ 的要求。为了满足 $1/4$ 行间置的要求,每行的最后一个正弦波取 $3/4$ 的采样点参与查找运算。为了实现 PAL 制信号逐行倒相,色度信号的 F_V 分量需要通过两张正弦查找表完成调制运算,两张查找表的频率幅值相等,相位相差 90° 。在一个二选一模块的控制下,第 n 行的 F_V 分量与第 $n+1$ 行的 F_V 分量分别送到这两张查找表中完成调制运算。

3.2 图像显示设计

如图 3 所示,红外图像在经过伪彩色编码和彩色视频编码后,图像中已经包含有色度信息。要让彩色监视器能够识别出其中的色度信息,还需要给视频信号加上复合同步信号、复合消隐信号以及解调彩色信息所需的色同步信号。

本系统探测器输出的红外图像帧频为 50 Hz ,而 PAL 制标准下显示图像的帧频为固定的 25 Hz ,按照奇、偶场显示图像,场频为 50 Hz 。为了保持图像显示的连续性,本文采用的方法是每一帧图像只取一场进行显示。若第 n 帧显示奇场(奇数行图像信息),则第 $n+1$ 帧显示偶场(偶数行图像信息)。在一般的图像显示程序设计中,由于输入格式与输出格式不匹配的问题,往往需要缓存至少一帧图像数据,这就需要至少 1 片外部存储器。在本系统中,由于只显示一帧图像的一场,另一场直接丢弃,所显示的一场或者是奇场,或者是偶场。显示每行图像都会有一行的缓存时间,所以不需要对图像缓存一帧就能实现图像的连续显示。在帧控制信号的作用下,同步、消隐信号产生模块按照标准 PAL 制式输出显示所需的行同步、场同步、行消隐、场消隐信号,同时图像输出控制模块负责将彩色图像数据写入 FIFO 缓存中,缓存若干行数据以后, FIFO 在消隐信号 blank 的控制下输出图像数据至全电视信号合成模块。 PAL 制彩色电视机在解调色度信号时,需要对 PAL 行送 $-\cos \omega_{sc} t$ 副载波,而对 NTSC 行送 $\cos \omega_{sc} t$ 副载波。因此需要一个识别 PAL 行与 NTSC 行的识别信息。这个识别信息是寄存在每一行的色同步信号相位中,即表现为相邻两行色同步信号的

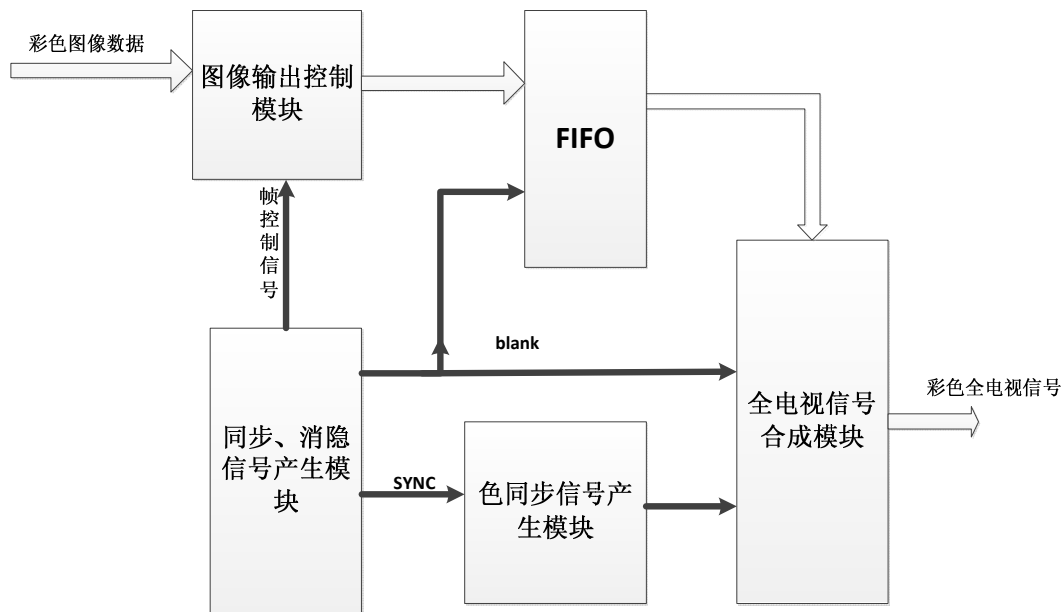


图 3 图像显示模块设计结构图

Fig.3 Schematic diagram of image display module

相位不同。通常情况下色同步信号由8~12个副载波周期组成,位于行消隐后肩上,起始点距离行同步脉冲前沿 $5.6 \pm 0.1 \mu\text{s}$,峰值等于行同步脉冲幅度,相对于消隐电平上下对称。本系统通过正弦查找表完成色同步信号的叠加,在每个行同步信号上叠加10个副载波周期。具体实现方法是在查找表中存放32个正弦采样点,对应着一个周期的正弦信号,幅值频率均符合色同步信号的要求,设置一个循环计数器,计数周期定为 $32 \times 10 = 320$ 个,计数器的值作为查找表的地址入口,这样就能实现输出10个小正弦波;考虑到相邻行的色同步信号相位不同,PAL行色同步信号的相位是 -135° ,NTSC行色同步信号的相位是 $+135^\circ$,所以构造两张相位不同的正弦查找表,在一个选择信号的控制下,每行信号依次选择不同的查找表入口。PAL制标准对消隐、同步信号的时间都有着严格的时序规定,在PAL电视显示原理的基础上,本文在设计显示电路时做了适当的改进。一般监视器的分辨率为 720×576 ,而本系统的输出图像为 320×240 ,扩大4倍显示为 640×480 ,都不能满屏显示,需要由图像控制模块将要显示的图像调整到屏幕中间,不需要显示的部分送出消



图4 原始红外图像

Fig.4 The raw infrared image

隐信号即可。实际调试效果表明显示的图像完全符合要求。在全电视信号合成模块中,将消隐、同步信号叠加到FIFO输出的图像数据上,就得到了数字编码的彩色全电视信号,将这个彩色全电视信号送到ADV7127数模转换器中。在采样时钟的作用下,输出模拟的彩色全电视信号,送到监视器即可实现红外图像的伪彩色显示。图4是探测器输出的原始红外图像,图5是经过伪彩色增强后的红外图像。

4 结论

本设计利用FPGA和ADV7127实现红外图像的伪彩色显示。红外图像的预处理和图像增强都在FPGA内部完成,并在FPGA中完成伪彩的编码设计和PAL制显示的编码设计。本系统较好地满足了红外图像的实时性处理要求,解决了系统中热像仪输出大动态范围和监视器显示输出小动态范围之间的矛盾。本文提出了一种改进的彩虹编码方法,可以自适应地调整红外图像显示的颜色变化层次。设计的图像显示方法不需要外部存储器缓存图像,只要使用FPGA的内部FIFO缓存几行图像数据即可,降低了系统功耗,也便于系统的小型化设计。

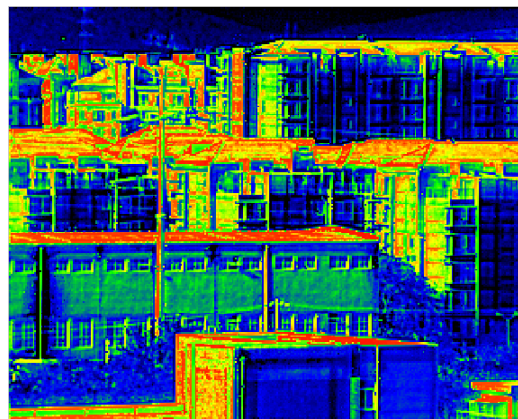


图5 伪彩增强后的图像

Fig.5 Pseudo-color coding image

参考文献:

- [1] 金伟其, 刘斌, 范永杰, 等. 红外图像细节增强技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2521-2527.
- [2] 邢向华, 顾国华, 张保民. 红外热成像双通道伪彩色测温系统[J]. 红外技术, 2003, 25(4): 92-94.
- [3] 李玉珏. 基于两点法的实用FPA非均匀性校正系统[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 753-755.
- [4] 王春平, 孙国正, 陈钱. 基于灰度冗余的红外图像直方图处理技术[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(2): 176-179.
- [5] 赵新宇, 乔彦峰, 王方雨, 等. 红外图像实时显示与高速存储系统的实现[J]. 红外技术, 2010, 32(10): 608-610.
- [6] Zuo Chao, Chen Qian, Liu Ning. Display and detail enhancement for high-dynamic -range infrared images[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 127401(1-9).
- [7] 张丽, 陈志强. 色彩调和理论在辐射成像的伪彩色处理中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(5): 233-235.
- [8] Peli E. Contrast in complex images[J]. Opt. Soc. Am. A, 1990, 7(10): 2032-2040.
- [9] 肖斌, 王暄, 毕秀丽, 等. 基于直方图的HIS空间伪彩色编码研究[J]. 陕西师范大学学报, 2007, 35(1): 61-63.
- [10] 王新成. PAL全电视信号的特征与处理技术[J]. 电视技术, 1997(5): 16-31.