

无人机机载视频去雾系统设计

王健^{1,2}, 秦春霞¹, 杨珂¹, 任萍¹, 郑洁^{1,3}, 赵远鹏², 陈贵锋⁴

(1. 西北工业大学 电子与信息学院, 西安 710129; 2. 西北工业大学 第365所, 西安 710065;
3. 山西汾西重工有限责任公司, 太原 030027; 4. 国家电网陕西省电力公司检修公司, 西安 710000)

摘要: 针对无人机机载雾天获取图像降质的问题, 设计基于嵌入式模块化视频去雾系统; 系统选用 TS1601 芯片作为视频去雾处理的核心, 设计数字视频 BT. 656/BT. 1120 隔行和逐行处理接口, iMX6 嵌入式系统完成去雾参数化控制、H. 264 视频压缩处理和组帧处理、外围接口设计和控制指令响应等设计, 完成去雾参数化处理、去雾控制功能、内循环等功能模块设计流程和实现; 实验测试结果表明, 该系统满足无人机机载视频去雾处理的需求, 具有功耗小、易实现和适应性强等特点, 满足无人机机载视频实时性去雾处理要求; 在客观评价中, 该系统和相关文献方法对典型含雾图像处理后并分别采用 TenenGrad 函数、方差函数、平均梯度函数等 3 种清晰度评价函数并做归一化处理进行评价, 其中对于含雾图像 3 处理后的 TenenGrad 函数归一化分别提高 47%、1.40%、12.80%, 方差函数归一化分别提高 12.50%、9.20%、11.20%, 平均梯度函数归一化分别提高 53.20%、3.60%、8.90%, 文章提出的算法整体运算时间提高 4.74 倍、5.41 倍和 5.46 倍。

关键词: 无人机; 机载; 去雾; 嵌入式; 串口

Design of the Airborne Video Demisting System for UCAV

Wang Jian^{1,2}, Qin Chunxia¹, Yang Ke¹, Ren Ping¹, Zheng Jie^{1,3}, Zhao Yuanpeng², Chen Guifeng⁴

(1. Electronic and Information College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. No. 365 Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710065, China;

3. Shanxi Fenxi Heavy Industry Company of Limited Liability, Taiyuan 030027, China;

4. Maintenance Company of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at the problem of image degradation during the UCAV capture the image for the interested target in the foggy day, we propose a system for video demisting based on embedded technology. The system adopts TS1601 as the main unit for the whole hardware system to complete demisting parameterization control, H. 264 video compression processing and framing processing, peripheral interface design and control command response and other function. This paper introduces the design of the system's design framework, software design frame work and software modules. The experimental results indicate that the system can fulfill the demand of video demisting in real time and have advantages such as low power consumption, easy implement. It can achieve the demand of the airborne demisting application. In the objective evaluation, our method and related references methods have used three kinds of definition evaluation functions (such as TenenGrad function, variance function and average gradient function) to evaluate performance for the typical misting image. For the image 3, the normalization of TenenGrad function after the demisting is increased by 47%, 1.40% and 12.80%, and the normalization of variance function is increased by 12.50%, 9.20%, and 11.20%, the normalization of the average gradient function increased by 53.20%, 3.60%, 8.90% respectively. And the overall operation time of our method is increased by 4.74 times, 5.41 times and 5.46 times.

Keywords: UCAV; airborne; demist; embedded technology; serial port

0 引言

在无人机对地侦察中, 需要获取地面感兴趣目标较为清晰的图像数据, 但空中雾霾等因素会影响获取的图像质

量。K. M. He 等提出基于暗通道先验的图像去雾算法, 利用软抠图细化透射率^[1]; 其后 K. M. He 采用导向滤波来提高运行效率, 但该算法对空中区域的处理效果尚需改善^[2]; Berman 利用雾度线基础上, 利用不同的透射系数恢复了距离图和无雾图像^[3]。F. Meng 等提出一种有效的正则化去雾算法, 通过探索固有的边界约束来恢复无雾图像^[4]。范新南等利用亮通道先验和模糊聚类对雾图进行场景分类^[5]; 王晗等提出信息熵与保真度相结合的单幅图像去雾方法。虽然上述算法在去雾效果上都有各自优势, 但需要满足机载实时处理等应用需求方面, 需要解决相关工程应用实现。针对机载视频去雾处理系统需要, 周晓波^[6]和龚亮^[7]分别采用 FPGA 实现相关去雾算法, 李昂^[8]和张海滨^[9]利用 ARM

收稿日期: 2019-10-12; 修回日期: 2019-11-09。

基金项目: 国家自然科学基金(61671383); 陕西省重点产业创新链项目(2018ZDCXL-G-12-2, 2019ZDLGY14-02-02, 2019ZDLGY14-02-03); 西北工业大学研究生创新基金(Z2017144)。

作者简介: 王健(1972-), 男, 西安市人, 博士, 副教授, 主要从事无人机智能情报处理技术、无人机对地观测视频信号处理技术、多源信息智能处理技术及无人机对地观测三维可视化技术方向的研究。

实现去雾算法效果。上述方法都可以得到较好的去雾效果,但存在时序和逻辑功能实现复杂、硬件资源和功耗要求高,外围接口电路设计也较复杂等问题,机载视频处理应用得到限制。为此,本文采用具有去雾功能的 ASIC 芯片 TS1601^[10],根据机载视频处理需要,利用 Freescale 公司 i.MX6 嵌入式系统^[11]设计系统控制初始化、去雾控制、去雾视频压缩处理、接口电路和指令响应等软件设计。

1 系统总体方案

系统机载图像去雾处理流程:首先,采用 Techwell 公司 TW9912 芯片采集模拟数据^[12],采用 Semtech 公司 GS2971 芯片获取数字高清数据^[13],设计 BT.656/BT.1120 数字视频信号输出;其次,采用 TSSI 公司专用去雾处理芯片 TS1601 设计相关去雾处理^[10];接着,采用 i.MX6 处理器完成 TS1601、视频采集和遥控遥测指令接收处理工作;最后,针对无人机信道受限情况,完成 i.MX6 数字视频信号 H.264 的压缩和数据组帧等工作。系统总体框图如图 1 所示。

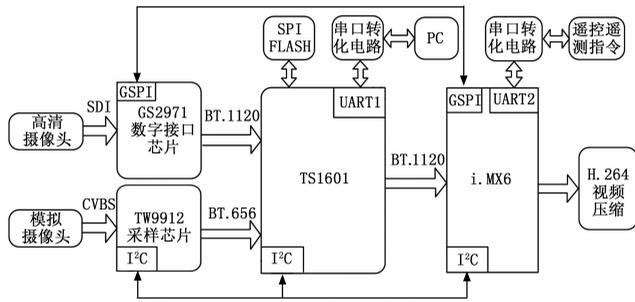


图 1 图像去雾系统总体框图

此外,采用 Winbond 公司 W25Q80BV 芯片设计 SPI Flash 存储,设计实现 TS1601 和 TW9912 采集芯片 I2C 接口控制功能、GS2971 芯片 GSPI 接口配置和控制、遥控/遥测指令处理电路完成机载遥控接收和遥测指令回报等。

1 硬件设计

1.1 去雾芯片设计

TSSI 公司的 TS1601 是一款高清视频处理芯片,具有去雾处理、2D/3D 图像去噪等功能。TS1601 可接收/发送 BT.656 和 BT.1120 格式等通用数字视频信号。TS1601 具有以下几点:1) 输入输出的格式:分别接收模拟视频输出的 BT.656 和数字高清视频输出的 BT.1120;2) 外围接口:外围接口有 16 个 GPIO 口,可被复用为 I2C 总线和 UART 等接口,还有专用 SPI 总线接口^[6]等接口的控制和通信;3) 低功耗:TS1601 处理芯片具有低功耗;4) 设计简单:去雾算法参数设置可以实时调整,时序、逻辑功能、去雾参数等实现相对简单。

1.2 视频采集芯片设计

标准模拟视频采集芯片的 D1 图像分辨率为奇偶场 720×288 两幅 BT.656 隔行数据,如果将其输出到 i.MX6 的 720×576 逐行视频接口,就会出现 top 和 bottom 两幅 720×288 (奇偶帧) 视频效果。常用隔行转逐行处理方法有以

下几种:1) 对 top 和 bottom 两场交错生成一帧图像处理算法;2) 用 top 或 bottom 一场代替一帧图像,但其插值算法会损害图像清晰度;3) 图像运动补偿算法,算法 CPU 占用和处理时间较大,达不到实时要求;4) 采用 TW9912 等芯片内部硬件处理方法,通过内部反交错引擎的隔行扫描视频转换成逐行 BT.656 视频数字信号,由硬件完成复杂的运动补偿等图像处理算法,视频采集效果最好,并且不占用系统处理资源,可满足系统实时处理需要。因此,将 TW9912 设计为逐行输出,计算其输出像素时钟 pixelclk 并对 i.MX6 的视频接口进行配置。BT.656 并行接口除了传输 4:2:2 的 YCbCr 视频数据流外,还有行、列同步所用的控制信号。TW9912 一帧 PAL 制式分辨率为 720×576 的图像数据由一个 625 行、每行 1728 字节 (1 440+280+4+4=1 728) 的数据块组成。其中,23~311 行 (288) 是偶数场视频数据,336~624 行 (288) 是奇数场视频数据,其余为垂直控制信号。根据公式:像素时钟 pixelclk=行数据×行数×帧率。对于 PAL 制式分辨率为 720×576 的隔行扫描图像数据, pixelclk 频率为: PAL: (1 440+280+4+4) × 625 × 25 = 27 000 000。如果采用逐行输出方式, PAL 制式的 pixelclk 应为 54 MHz,比隔行输出 pixelclk=27 MHz 增大一倍,其帧数也增大一倍由 PAL: 25→50。此外,由于在视频图像的采集过程中,不同端口大小、不同阶段,数据的字节顺序是非常重要的。为了对图像数据进行灵活打包,在视频接口软件设计数据缓存交换空间进行打包。

数字视频信号芯片 GS2971 是一款支持标清、高清和 3 Gb/s 多种速率的 SDI 接收器,该芯片利用 SPI 总线进行初始化配置和控制。设计中,设计 GS2971 完成接入 SDI 视频 YCBCR 数据转换和 BT.1120 输出,经过匹配电阻接入 i.MX6 视频处理芯片,保持视频信号传输阻抗匹配。

2 软件设计

根据系统功能和设计的需要,系统软件采用模块化设计,其中主程序、去雾处理算法、H.264 压缩处理、遥控指令响应程序、遥测信息回报等软件分别采用嵌入式平台软件编程。

2.1 系统主程序设计

系统主程序流程如图 2 所示。主处理程序主要分为芯片初始化、芯片探测、事件发送和响应操作和内核循环 5 个模块。根据需要,系统处理主程序采用嵌入式模块化的设计思想,软硬件有机结合构成一个功能完整的一体化的控制模块。具体设计如下:

上电后,程序对系统进行初始化,完成视频接口芯片 TW9912 和 GS2971、去雾处理芯片 TS1601 初始化工作、i.MX6 嵌入式系统初始化、串口初始化、系统相关处理事件初始化;实现模块化设计,针对系统各个接口和去雾处理参数配置脚本设计;系统初始化时,可以根据系统硬件设置和控制参数情况,直接调用对应脚本文件,能够快速、直接、准确地配置模块参数;内核循环流程,设计无人机视频 H.264 压缩码率受控处理软件,解决压缩编码的运动

估计搜索范围、最大关键帧间距、SPI 接口缓冲区码率控制机制问题, 完成系统 SPI 输出码率受限软件设计^[12]。

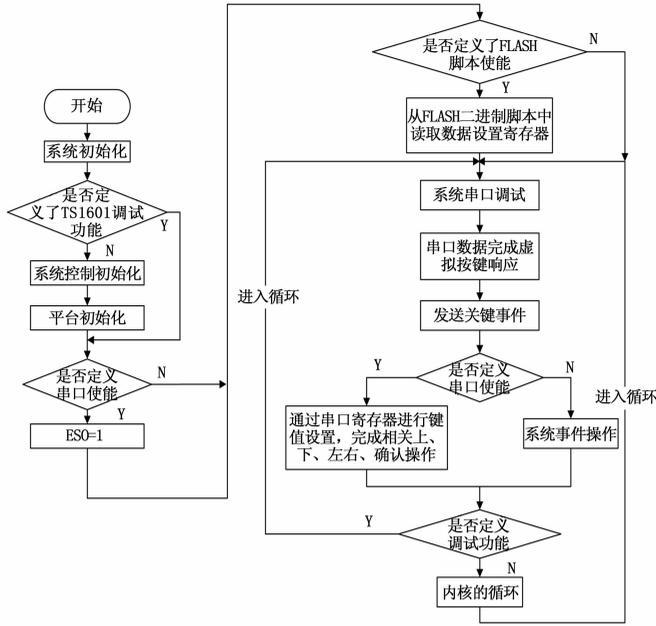


图 2 系统处理主程序软件流程图

2.2 系统去雾遥控指令接收处理设计

无人机机载去雾处理系统在满足去雾功能基础上, MX6 接收的遥控指令包括同步帧头和控制指令等, 接收和处理的遥控和遥测指令数据需要逐字节进行解析、判断、处理和回报。设计遥控指令的每帧指令由 64 个字节组成, 前两个字节为遥控指令帧头。当嵌入式系统串口接收到遥控指令后, 系统根据遥控指令帧结构完成相应遥控解译操作。其他功能设计如下:

1) 机载去雾系统初始化: 由于系统通过初始化完成相关 TS1601 去雾接口和状态配置, 因此需要关闭系统中断响应并在去雾配置完成后再根据需要进行开启。

2) TS1601 芯片的去雾功能初始化: 根据机载视频去雾处理要求, 完成 TS1601 芯片的去雾处理算法参数设置 (参见 2.3 节), 系统采用配置脚本方式, 快速准确实现机载去雾处理模式设置。TS1601 芯片初始化流程如图 3 所示。

2.3 系统视频去雾参数设计

无人机机载视频大多是场景变化缓慢对地观测场景, 应针对机载图像特性和实际工程情况设计去雾参数。对于机载获取的图像雾化主要表现为图像对比度和明度减小, 去雾处理上需要提高图像对比度和明度。因此, 机载视频去雾参数系统采用大气散射模型从机载图像去雾 $I(x)$ 、大气光值 A 和透射率 $t(x)$ 中恢复出图像 $J(x)$ ^[11]:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (1)$$

$$t(x) = 1 - \min(\min_{y \in \Omega(x)} \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I}{A}) \quad (2)$$

式中, $\Omega(x)$ 表示一块方形区域, I 表示含雾图像的一个颜色通道。在求取透射率图时使用最小值滤波并不符合机载视

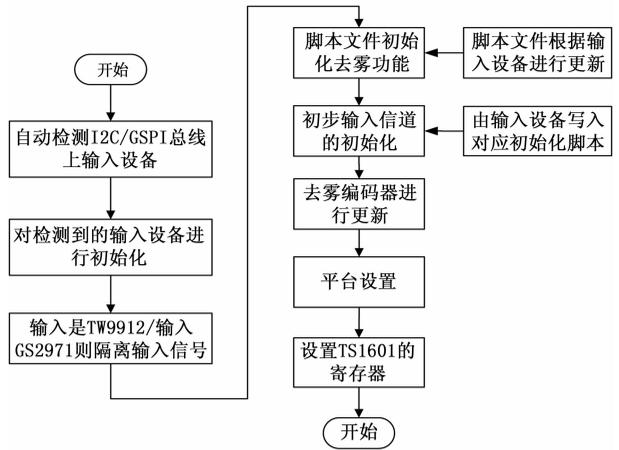


图 3 TS1601 芯片初始化流程

频图像景物深度基本一致的情况^[1-3,5], 改进的去雾算法复杂度较高^[3-5], 不利于机载景物深度变化较大的区域透射率的实时估算。例如, 超低能见度情况下地面雾霾浓度过大, 图像去雾处理时会使得去雾后的图像噪声偏大, 需要进行不完全去雾; 当地面能见度较高雾霾浓度很低, 不需要对图像进行去雾处理。针对机载图像视场变化缓慢的快速去雾处理, 本文提出一种机载图像 HSV 分量确定透射率。

首先, 机载图像色调、饱和度和明度各分量的平均值分别为:

$$Ave_H = \frac{Sum(H)}{N_1}, Ave_S = \frac{Sum(S)}{N_2}, Ave_V = \frac{Sum(V)}{N_3} \quad (4)$$

式中, $Sum(H)$, $Sum(S)$ 和 $Sum(V)$ 为图像中所有像素点色调分量 H 、饱和度分量 S 、明度分量 V 的总和, N_1 、 N_2 、 N_3 为分量值不为 0 的像素点数量, Ave_H 、 Ave_S 和 Ave_V 为图像中各分量的平均值。根据实验数据测试分析, 结合飞机总体设计对机载图像去雾处理系统技术指标要求, 将机载含雾图像按照如下含雾等级设定。

含雾图像等级 1:

$$(Ave_H < 100) \&\& (Ave_S < 0.07) \&\& (Ave_V < 0.5) \quad (5)$$

含雾图像等级 2:

$$(Ave_H < 125) \&\& (Ave_S < 0.2) \&\& (Ave_V < 0.48) \quad (6)$$

其次, 根据 HSV 分量确定含雾图像等级对透射率进行调整, 在含雾图像等级为 1 的区域需要对透射率进行放大, 而在含雾图像等级为 2 的区域需要对透射率保持不变, 定义透射率为:

$$t(x) = \begin{cases} 1 - \min(\min_{y \in \Omega(x)} \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I}{A}) \\ (Ave_H < 125) \&\& (Ave_S < 0.2) \&\& (Ave_V < 0.48) \\ \frac{M}{|I(x) - A|} (1 - \min(\min_{y \in \Omega(x)} \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I}{A})) \\ (Ave_H < 100) \&\& (Ave_S < 0.07) \&\& (Ave_V < 0.5) \end{cases} \quad (7)$$

式中, 阈值 M 定义为含雾图像中对比度大于图像 HSV 分量对比度阈值 S (一般取 $S=2$) 的像素值个数 p 占总像素点个数 n 相比, 即: $M = p/n$ 。无人机机载含雾图像表现为

对比度较差, 所选取的阈值 M 也应该不同: 图像中对比度区域较小的图像选取较大的 M 值; 图像对比度较大选取较小的阈值 M 。本文按照含雾等级的去雾处理方法, 不同于文献 [2-4] 复杂参数计算方法, 计算效率得到提高并且系统实时性也得到保障。

2.4 视频去雾处理设计

视频去雾处理芯片 TS1601 中有视频去雾寄存器、I2C 总线的寄存器、SPI 总线寄存器、OSD 寄存器等多种寄存器。通过设置相关去雾寄存器 (DEMIST_ENABLE、DEMIST_WIN_LT 等) 的状态来达到去雾的目的。其他有关图像去噪, 视频 OSD 功能处理等软件流程略。

无人机机载视频大多是场景变化缓慢对地观测场景, 应针对机载图像特性和实际工程情况采用不同去雾方式和模式对视频进行实时去雾处理。设计视频去雾处理软件如下: 首先进行去雾功能的初始化, 包括设置去雾最大的亮度和最大的色度; 其次, 根据输入设备判定并更新相应的脚本参数; 然后, 去雾系统根据从串口接收到的去雾指令进行处理, 获得去雾事件的 ID 号和参数 $temp$, 并根据事件的 ID 号判断去雾事件的类型。在去雾事件中软件设计中: 1) 若 $temp=0$, 设置去雾的工作模式为关闭的状态; 2) 若 $temp=1$, 设置去雾的工作模式为全双工方式, 设置去雾的工作电平为高电平有效, 根据获取的参数 $temp=1$ 选择去雾模式 1 并对相关的寄存器进行设置; 3) 若 $temp=2$, 设置去雾的工作模式为全双工方式, 设置去雾的工作电平为低电平有效, 根据获取的参数 $temp=1$ 选择去雾模式 2 并对相关的寄存器进行设置。

3 实验测试

采用实际硬件平台, 完成相关去雾处理方法的实验测试。实验测试采用实际采集图像和相关公开测试图像进行测试对比, 图像去雾效果对比如图 4 和图 5 所示。图 4 (a)、(b) 表示含雾等级 1 去雾效果图, 图 4 (c)、(d) 表示含雾等级 2 去雾效果图。从含雾等级 1 结果看, 由于含雾量一般, 区域透射率保持不变, 而含雾等级 2 其含雾量较大, 区域透射率需要调整, 两种等级去雾后的图像都接近于自然。

为了更加客观地比较含雾等级去雾处理的效果, 选择典型文献 [2-4] 去雾方法进行比较, 并利用 TenenGrad 函数、方差函数、平均梯度函数等 3 种清晰度评价函数 [15] 来评价去雾效果, 并对得到函数值做归一化处理, 结果如表 1 所示。由图 5 测试结果可见, 根据含雾等级对透射率进行分析和加权调整, 相对于文献 [2-4] 具有良好的适应性。K. M. He 等算法 [2] 对于大部分图像具有良好的去雾效果, 所提暗通道先验方法存在对大气光近似目标场景估计不足等问题, 缺乏层次感, 去雾图像整体亮度偏暗并存在失真情况, 图 5 (b) 第二幅图像左上角还会出现不均匀色块情况; Berman 等 [3] 算法整体亮度和色彩对比度上有所提升, 但是某些图像的边缘出现伪轮廓, 如图 5

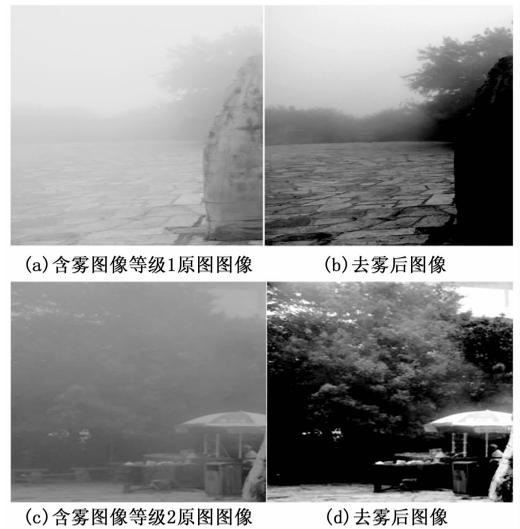


图 4 去雾前和去雾后处理效果对比图

(c) 第一幅图像远处的模糊场景并没有清晰恢复; F. Meng 等 [4] 算法对于弱光照区域会出现对比度和亮度偏低的情况, 如图 5 (d) 第三幅图像所示天空区域图像信息丢失并出现色块。由表 1 可见, 本文算法绝大多数情况下各项评价指标是最优的, D. Berman 等 [3] 和 F. Meng 等 [4] 算法分别在图 5 (c) 第二幅图和图 5 (d) 第一幅图 TenenGrad 函数指标客观评价要优于本文方法, 但本文方法在保持去雾优良效果的同时还保持较快处理速度, 进一步增强算法的实用性。

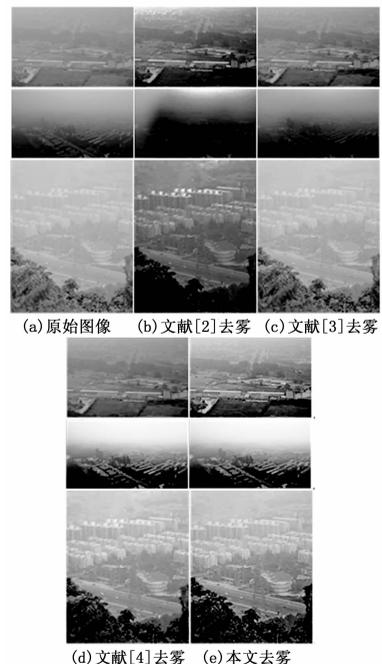


图 5 文献方法和本文方法去雾前和去雾后处理效果对比图

4 结束语

本文提出一种无人机机载图像去雾处理系统设计。系统可根据机载含雾图像等级进行去雾图像参数化分析, 完成相关图像压缩、遥控遥测指令接收和发送、机载实时去雾

表 1 去雾性能客观评价结果

原始图像	性能指标	原图	文献 2 方法	文献 3 方法	文献 4 方法	本文方法
第 1 副图像	方差函数	0.33	0.547	0.645	0.715	0.745
	平均梯度函数	0.32	0.698	0.723	0.754	0.798
	TenenGrad 函数	0.30	0.505	0.695	0.743	0.705
	运行时间	—	42.476	56.611	87.121	14.631
第 2 副图像	方差函数	0.23	0.532	0.702	0.642	0.742
	平均梯度函数	0.25	0.674	0.765	0.712	0.792
	TenenGrad 函数	0.27	0.606	0.866	0.786	0.806
	运行时间	—	115.492	115.481	127.654	15.654
第 3 副图像	方差函数	0.12	0.431	0.624	0.561	0.633
	平均梯度函数	0.13	0.797	0.821	0.807	0.897
	TenenGrad 函数	0.17	0.564	0.834	0.794	0.864
	运行时间	—	121.834	136.261	137.258	21.251

等处理工作, 满足机载视频图像去雾系统实时性处理需要。实验测试结果表明, 该系统满足无人机机载视频去雾处理的需求, 可有效降低图像去雾处理复杂度, 具有功耗小、易实现和适应性强等特点, 满足无人机机载图像实时去雾处理要求。

参考文献:

[1] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33 (12): 2341 - 2353.

[2] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 (6): 1397 - 1409.

[3] Berman D, Treibitz T, Avidan S. Non-local image dehazing [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on

Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 1674 - 1682.

[4] Meng F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision [C]. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2013: 617 - 624 .

[5] 范新南, 冶舒悦, 史鹏飞, 等. 改进大气散射模型实现的图像去雾算法 [J]. 计算机辅助设计与图形的学报, 2019, 31 (7): 1148 - 1155.

[6] 王 晗, 朴斗福, 魏 明, 等. 信息熵-保真度联合度量函数的单幅图像去雾方法 [J]. 计算机辅助设计与图形的学报, 2019, 31 (7): 1175 - 1182.

[7] 周晓波, 何魁华, 周 聪. 基于 FPGA 的图像高速去雾实时系统设计实现 [J]. 电视技术, 2018, 42 (4): 67 - 72.

[8] 李 昂, 刘 鹏, 王晓曼. 基于 Zynq-7000 的海雾图像嵌入式系统设计 [J]. 信息通信, 2017, 10: 59 - 61.

[9] 张海斌. 基于 zynq 实时视频图像去雾系统的设计 [D]. 上海: 上海师范大学, 2018.

[10] TS1601 3D HD Video Enhance Processor Product Data sheet [M]. www.tssic.com/, 2012-01-13.

[11] Freescale, i. MX6 Dual/6Quad Multimedia Applications Processor Reference Manual [M]. 2012, 1.

[12] Techwell. Data sheet of TW9912 [M/CD]. www.techwellinc.com, 2011, 10.

[13] Gennum Corporation. GS2971 DataSheet [Z]. 2009: 1 - 2.

[14] 王 健, 辛向龙, 张修飞. 基于 i.MX6 无人机视频码率受控的压缩系统设计 [J]. 火力与指挥控制, 2016, 41 (11): 148 - 152.

[15] 李 雪, 江旻珊. 光学显微成像系统图像清晰度评价函数的对比 [J]. 光学仪器, 2018, 40 (1): 28 - 38.

(上接第 128 页)



图 9 系统仿真波形

位于该节点与主机中间的所有节点对数据进行转发。

6 结束语

对于某些对电缆重量及直径较为敏感的多节点数据采集传输系统, 本文提出了分析了多种可行的传输方式后, 选取了“总线模型-主机同步源”的方式, 使用 Verilog 硬件描述语言设计 RTL 代码并在 Modelsim 中完成功能仿真验证。该方式代码设计简单, 维护性强, 可靠性高, 占用

芯片资源少。目前已研制出搭载本文所设计代码的系统样机, 并通过试验验证, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] 许义宝, 胡永兵, 陈庆然. 基于 FPGA 的多节点光纤传输系统设计与实现 [J]. 计算机技术与发展, 2018, 28 (3): 197 - 200.

[2] 袁俊杰, 胡天宇. 基于 FPGA 的多传感器集成光纤传输系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2015 (3): 43 - 46.

[3] 张大朋, 白 勇, 朱克强. 不同模式下拖缆对水下拖体运动姿态的影响研究 [J]. 船舶力学, 2018, 22 (8): 55 - 64.

[4] 常宗杰. 海洋勘探拖缆多传感器数据采集传输控制技术及实现 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[5] 朱建华. 分布式数据同步采集系统的设计与实现 [D]. 合肥: 安徽大学, 2014.

[6] 宋玉贵, 毕 倩. 分布式同步数据采集系统的研究与设计 [J]. 工具技术, 2013, 47 (1): 65 - 68.

[7] 崔 嵬, 王 巍. 高性能 FPGA 系统: 时序设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.