

文章编号: 2095-4980(2019)02-0309-06

## 基于 SoPC 的视频图像快速去雾

刘金华<sup>1</sup>, 韦家军<sup>\*2</sup>, 孙梧雨<sup>2</sup>, 任雪美<sup>2</sup>, 廖鹏<sup>2</sup>, 安必义<sup>2</sup>

(1.浙江传媒学院 电子信息系, 浙江 杭州 310018; 2.西南科技大学 国防科技学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 针对现有图像去雾算法时间复杂度高, 难于实时处理的问题, 提出一款基于片上可编程系统(SoPC)的视频图像快速去雾系统。介绍了平台的软件流程和硬件结构, 对暗原色先验和导向滤波理论进行深入研究, 并将暗原色先验和导向滤波算法移植到所设计的 SoPC 平台上进行测试。测试结果表明, 该系统能满足视频图像实时去雾的要求, 并且恢复的图像清晰, 对比度好, 颜色自然。

**关键词:** 图像去雾; 暗原色先验; 导向滤波; 片上可编程系统

**中图分类号:** TN79<sup>+1</sup>; TP37 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201902.0309

## Fast dehazing for video image based on SoPC

LIU Jinhua<sup>1</sup>, WEI Jiajun<sup>\*2</sup>, SUN Wuyu<sup>2</sup>, REN Xuemei<sup>2</sup>, LIAO Peng<sup>2</sup>, AN Biyi<sup>2</sup>

(1.Department of Electronics Information, Communication University of Zhejiang, Hangzhou Zhejiang 310018, China;  
2.School of National Defence Sci. & Tech., Southwest University of Sci. & Tech., Mianyang Sichuan 621010, China)

**Abstract:** A System on a Programmable Chip(SoPC) based fast dehazing system for video image is proposed, aiming at the problems of high time-complexity and difficulties in real-time processing for existing algorithms. Firstly, the hardware structure and software process of the SoPC based platform are introduced. And then the algorithms of dark channel prior and guided filter are studied. At last, the algorithms are transplanted to the proposed platform. The experiment demonstrates that the system can meet the requirement of the real-time dehazing effectively, and restored images are pretty clear with fine contrast and natural color.

**Keywords:** image dehazing; dark channel prior; guided filter; System on a Programmable Chip

户外视频监控系统在维护公众安全方面发挥着日益重要的作用, 然而在有雾天气下拍摄的图像<sup>[1]</sup>, 由于大气中浑浊的媒介对光的吸收和散射影响严重, 导致图像对比度降低, 动态范围缩小, 清晰度不够, 细节信息不明显, 许多特征模糊, 信息的可辨识度大大降低<sup>[2]</sup>。因此, 对雾天图像清晰化处理成为当前计算机视觉领域的一个重点研究方向。如今雾天图像清晰化处理技术的方法主要有 2 种: 基于图像增强的方法<sup>[3]</sup>和基于物理模型的复原方法。为了使图像去雾效果更加明显, 何凯明等提出基于暗原色先验理论的单幅图像去雾技术<sup>[4]</sup>, 并通过软抠图(Soft Matting)技术优化透射图<sup>[5]</sup>。然而软抠图技术的时间复杂度很高, 如, 对分辨率为 600×400 的视频图像处理时间约为 2 s(3.70 GHz AMD A4-6300B APU with Radeon(tm) HD Graphics), 难以满足实时性的要求。因此, 本文在对暗通道理论和导向滤波<sup>[6]</sup>算法进行深入研究的基础上, 提出一种基于片上可编程系统(SoPC)的视频图像快速去雾算法。

### 1 去雾算法原理

#### 1.1 大气散射模型

大气散射光直接影响成像质量<sup>[7]</sup>, 因此有必要研究大气散射光的相关特性<sup>[8]</sup>。目前, 由 McCartney 所提出的

收稿日期: 2017-12-26; 修回日期: 2018-01-20

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2016C33040); 四川省科技创新苗子工程重点基金资助项目(2017RZ0058); 四川省科技创新苗子工程培育基金资助项目(2016012); 四川省教育厅重点基金资助项目(16zd1121)

\*通信作者: 韦家军 email:xkd\_wjj@163.com

大气散射模型使用最为广泛, 通过该模型来模拟雾天有雾图像的退化过程。因此, 该模型又称作大气散射模型, 可用式(1)表示:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)) \quad (1)$$

式中:  $I(x)$ 表示获取的有雾图像;  $J(x)$ 表示清晰自然的复原图像;  $A$ 是整体大气光;  $t(x)$ 表示介质传输率, 又称透射率图。图像去雾的目的就是从  $I(x), t(x)$ 和  $A$ 中复原出清晰无雾图像  $J(x)$ 。

### 1.2 暗通道先验理论

暗通道先验是在无雾图像中绝大多数非天空的局部区域, 或在无雾图像中景物的阴影或投影以及色彩鲜艳的物体表面区域, 总有某一些像素在至少一个颜色通道里具有很低的值。换言之, 该区域光强度的最小值是个很小的数, 且趋于零, 即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} J^c(y) \right) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\Omega(x)$ 表示以像素  $x$ 为中心的一个窗口;  $J^c$ 表示彩色图像的 3 个通道; 上标  $c$ 表示 r(红)、g(绿)、b(蓝)3 个通道。

假设图像尺寸为  $N$ , 式(1)有  $3N$ 个已知量,  $4N+3$ 个未知量, 这是一个有着无数解的方程, 是个病态问题。如果要求解这个病态问题, 常用的方法是对未知量添加先验信息, 缩小解空间的维度。将式(1)变形为:

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = \frac{J^c(x)}{A^c} t(x) + 1 - t(x) \quad (3)$$

上述讨论假设全球大气光照  $A$ 是已知的且是一个常数, 而实际中,  $A$ 值是通过暗通道求取的。全球大气光照  $A$ 在 He 算法中求取过程如下: 在暗通道中提取最亮的前 0.1%个像素点, 在原始有雾图像中寻找这些点相应位置上的具有最高亮度的点, 并以这些点像素值作为  $A$ 值。考虑到当透射率  $t(x)$ 值趋近于零时, 恢复出来的图像容易产生噪声, 于是设置阈值  $t_0$ , 当  $t(x)$ 值小于  $t_0$ 时, 令  $t(x)=t_0$ , 通常取  $t_0$ 为 0.1。

如果上述所有未知量均已求出, 可以恢复出无雾图像, 即:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (4)$$

### 1.3 导向滤波

由于暗通道和透射率分布具有块效应, 为了解决该问题, 何凯明等使用软抠图的方法对透射率进行了优化, 然而在计算过程中需要构建大量的拉普拉斯矩阵, 在透射率的优化上耗费了大量时间。为了提高透射率优化的速度, 笔者尝试用导向滤波(Guided Filter)代替软抠图对透射率进行优化。

Guided Filter 是 He 在 2010 年提出的具有保边去噪性能的新型滤波器, 该滤波器工作时需要一个引导图, 通常在去雾算法中将原始图像作为引导图并计算出细化的暗通道图。

设  $I$ 为引导图像,  $q$ 为输出图像,  $\omega_k$ 是运算过程在以像素点  $k$ 为中心的矩形框, 设定  $I$ 与  $q$ 呈线性关系:

$$q_i = a_k I_i + b_k, i \in \omega_k \quad (5)$$

如果假设噪声信号为  $n$ , 即原始图像中的不平滑信号,  $p$ 是原始输入信号, 输出图像  $q$ 则为输入图像  $p$ 去除噪声后的结果:

$$q_i = p_i - n_i \quad (6)$$

为同时满足上述公式, 并且使  $q$ 与  $p$ 的差别为最小,  $a_k, b_k$ 的求解转化为最优化问题:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} \left( (a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \varepsilon a_k^2 \right) \quad (7)$$

利用线性回归的方法得:

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (8)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (9)$$

式中: 矩形窗口  $\omega_k$ 中的平均值为  $\mu_k$ , 方差为  $\sigma_k^2$ ;  $|\omega|$ 是该窗口所包含的像素点个数。求出  $a_k$ 和  $b_k$ , 将其代入最初设定模型中, 即可求得最终的输出  $q$ 。

## 2 图像去雾平台

### 2.1 软件流程

本图像去雾系统软件部分主要包括图像去雾处理程序以及图像编解码和接口控制程序，其中图像去雾处理流程<sup>[9]</sup>如图 1 所示。

首先读入有雾图像  $I$  并计算其最小通道值，得到暗通道图，结合暗通道图和开始读入的有雾图像  $I$ ，估测出大气光照  $A_0$ ，并通过滑动平均之后得到  $A$ 。然后利用透射率的求解公式得到粗估计的透射率图  $t(x)$ ，由于粗估计的透射率图  $t(x)$  中景深突变的区域会产生马赛克现象，需要经过上采样之后利用导向滤波的方法来平滑该区域，达到保持边缘的目的<sup>[10]</sup>。经导向滤波得到优化后的下采样透射率，最后再经过上采样，得到原来尺寸的优化后透射率图  $t(x)$ 。由于天空等白色区域不满足暗原色先验的规律，这些区域的透射率被低估，需要进行修正<sup>[11]</sup>。通过式(10)计算像素点  $l$  范数作为与  $A$  的距离。

$$\Delta_{\max}(x) = \max_{c \in \{r, g, b\}} \{I^c(x) - A\} \quad (10)$$

然后将  $\Delta_{\max}(x)$  与阈值比较以判定是否需要修正。当小于阈值时，则判定为等亮的天空区域。修正如下：

$$t'(x) = \min\left(\frac{D}{\Delta_{\max}(x)} t(x), 1\right) \quad (11)$$

在修正天空区域的  $t(x)$  之后，结合滑动平均的大气光照  $A$ ，通过图像复原公式还原出无雾图像  $J$ 。

由于还原出的无雾图像对比度较低，使得图像看起来不够真实，因此本文对初步去雾后的图像  $J$  进行自适应亮度调整。首先对其各像素点 RGB 三通道做同比例增强，以保持物体颜色，得到最终的复原图像  $J'$ 。

### 2.2 硬件结构

硬件平台由视频采集卡 (Video-capture card)、SoPC 芯片以及各种外设接口组成，如图 2 所示。

平台采用 Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC XC7Z020，其具有 140 万门电路的逻辑资源并将 ARM (Advanced RISC Machines) 处理器和现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA) 架构紧密集成，拥有由 2 颗 ARM@CortexTM-A9 核组成的处理核心部分 (PS)，以及一颗 Xilinx7 系列 FPGA 核心 Artix@-7 所构成的可编程逻辑部分 (PL)，能够实现软硬件的协同设计。DDR3 和 TF card 分别作为芯片嵌入式软件开发的内存和程序存储器。静态随机存取存储器 (Static Random Access Memory, SRAM) 提供 FPGA 视频处理时的外部缓存。通用串行总线 (Universal Serial Bus, USB) OTG (On The Go) 提供键盘鼠标等外设接口，USB 到通用异步收发传输器 (Universal Asynchronous Receiver Transmitter, UART) 是与 PC 通信的串口，可提供系统研发时的调试参数、系统设置参数以及静态图像输入通道。另外硬件平台还提供了 Gbit 以太网接口 (Gig Ethernet)，1080P 高清视频显示接口 (High Definition Multimedia Interface, HDMI)，以及用以感知户外现场环境温度的温度传感器。户外场景由视频采集卡获得的有雾图像信息经过 SoPC 芯片处理后，由 HDMI 接口送至 LCD 显示去雾后的图像。

为了方便比较图像去雾效果，设置了图像处理旁路功能开关，可以实现有雾图像的直通显示。

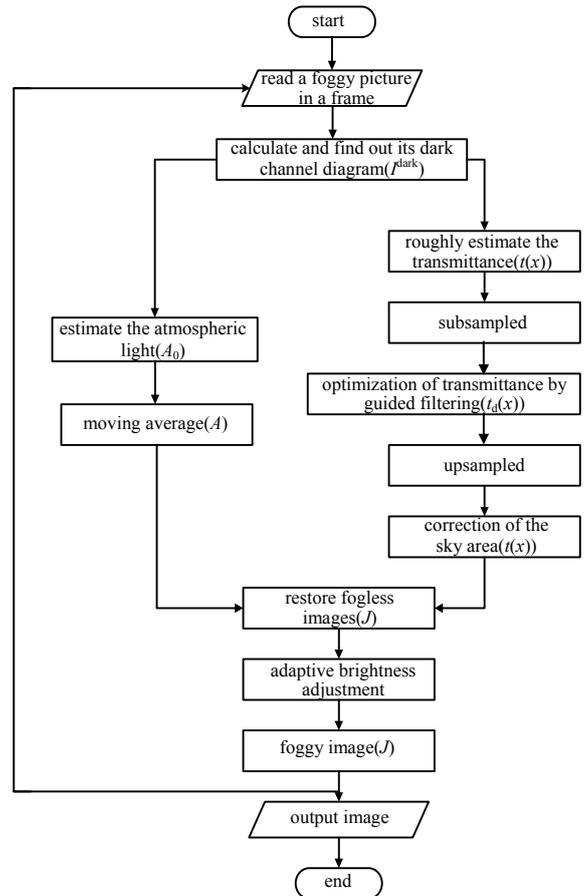


Fig.1 Dehazing algorithm process  
图 1 去雾算法流程

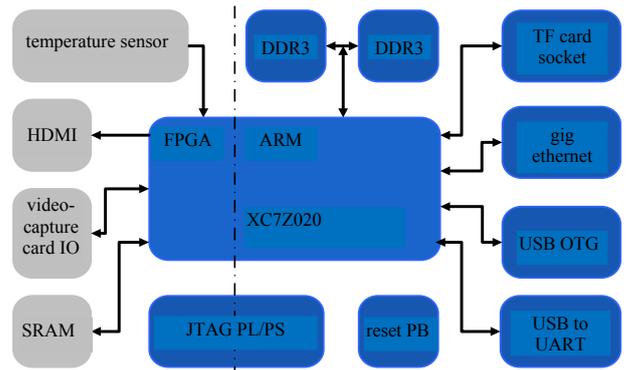


Fig.2 Hardware platform of image dehazing system  
图 2 图像去雾系统硬件平台

算法移植到 FPGA 上主要分为 4 个模块,暗通道图求取、大气光照  $A$  的获取、透射率的计算及优化和图像复原模块。在暗通道的求取过程中需要设置一个窗口大小为  $3 \times 3$  的最小值滤波器,频繁地移动该窗口以计算窗口内像素的 3 个通道强度的最小值。由于 FPGA 运算速度快与并行处理的特性,在求得暗通道图时可以同时通过算法获取大气光照  $A$  以及计算并优化透射率,最后将图像复原出来。这期间需要不断访问窗口存储区、图像存储区,会占用较多的先入先出(First Input First Output, FIFO)及高速寄存器资源,这部分工作则交给 ARM 处理器来完成。

通过有效系统的设计和算法的研究,利用 SoPC 芯片 XC7Z020 的高速计算能力和丰富的 I/O 口,完成了快速图像去雾处理板的设计。将图像快速去雾算法移植到该平台上可以快速复原雾天环境下拍摄的实时视频图像,得到的复原图像清晰自然。基于 SoPC 的视频图像快速去雾平台如图 3 所示。



Fig.3 Fast dehazing processing board for video image based on SoPC  
图 3 基于 SoPC 的视频图像快速去雾平台

### 3 结果与分析

为了测量系统性能,开展了一系列实验并与 PC 平台算法处理进行比较,下面给出其中部分结果。图 4 显示了有无雾图像和它们对应的暗通道,可以看出无雾图像的暗通道灰度值较低,而有雾图像的暗通道图中大部分区域则具有较高的灰度值。

图 5 给出了分别经过导向滤波和双边滤波算法<sup>[12]</sup>处理后图像的细节对比。由图 5(b)和图 5(c)可以看出,在细节上的处理方面,导向滤波算法优于双边滤波算法,处理后的图像边缘更加平滑、自然<sup>[13]</sup>。



(a) fogless images and dark channels



(b) foggy images and dark channels

Fig.4 Comparison of foggy/fogless graphs and their dark channel maps  
图 4 有无雾图及其暗通道图对比

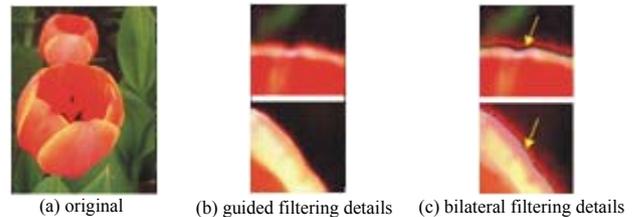


Fig.5 Contrast of image dehazing details

图 5 图像去雾细节对比

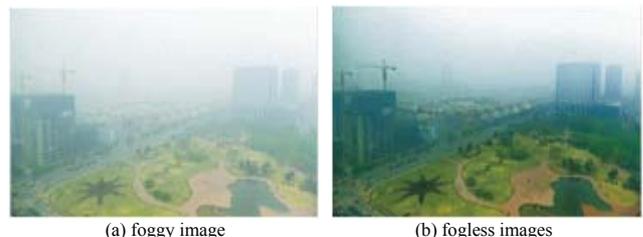


Fig.6 Image of fog effect renderings

图 6 图像去雾效果图

构造函数对去雾效果进行客观评价,考虑到无雾图像暗通道灰度值趋于零,构造评价函数:

$$\eta = \frac{\sum_x I^{\text{dark}}(x) - \sum_x J^{\text{dark}}(x)}{\sum_x I^{\text{dark}}(x)} \quad (12)$$

通过对去雾前后图像暗通道灰度值求和并计算相对差值,  $\eta$  能够较好地评价去雾效果,  $\eta \leq 0$  表示没有去雾效果;  $\eta=1$  表示完全去雾。图 6 中有  $\eta=0.95$ , 图 5 中全图导向滤波  $\eta=0.94$ , 双边滤波  $\eta=0.93$ 。由于  $\eta$  对图像暗通道灰度值做了求和运算,因此  $\eta$  是对去雾效果进行总体的评价,而对恢复图像的细节评价仍需要采用主观评价,如图 5 所示的图像对比。

针对分辨率为  $600 \times 400$  的视频雾天图像去雾,表 1 给出了不同算法在 PC,SoPC 平台上运行耗时对比,其中 PC 机 CPU 为 3.70 GHz AMD A4-6300B。

从表 1 可以看出, 在 PC 机上进行算法处理时, 导向滤波算法相比于软抠图算法, 速度有了明显提高<sup>[14]</sup>。而将基于暗通道和导向滤波的去雾算法移植到本文设计的 SoPC 平台上<sup>[15]</sup>, 在去雾效果不变前提下, 处理时间有一个数量级的缩短。实际测试视频图像处理帧速能够达到 25 帧/秒, 满足视频图像实时去雾的要求。

#### 4 结论

提出的基于 SoPC 视频图像快速去雾系统处理速度快, 去雾效果明显, 恢复后的图像颜色自然、清晰, 为图像直接利用和后续处理提供接近于原图的信息。该系统可以直接应用于高速公路监控、公众户外监控、机场监控的成像系统中, 也可以很方便地移植到智能导航、卫星遥感监测、对地侦察等领域的成像系统中, 有着广阔的市场前景。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 胡伟,袁国栋,董朝,等. 基于暗通道优先的单幅图像去雾新方法[J]. 计算机研究与发展, 2010,47(12):2132-2140. (HU Wei,YUAN Guodong,DONG Chao,et al. A new method for single image dehazing based on dark channel priority[J]. Computer Research and Development, 2010,47(12):2132-2140.)
- [ 2 ] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage,AK,USA:IEEE, 2008:1-8.
- [ 3 ] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008,27(3):72-76.
- [ 4 ] HE K,SUN J,TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]// 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami,FL,USA:IEEE, 2009:1956-1963.
- [ 5 ] NARASIMHAN S G,NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003,25(6):713-724.
- [ 6 ] HE Kaiming,SUN Jian,TANG Xiaou. Guided image filtering[C]// Proceeding of the European Conference on Computer Vision. Heraklion:Springer, 2010:1-14.
- [ 7 ] STARK J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000,9(5):889.
- [ 8 ] 於敏杰. 雾天环境下的图像增强算法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015. (YU Minjie. Research on image enhancement algorithm in foggy environment[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science and Technology, 2015.)
- [ 9 ] 刘光飞,胡辽林. 暗通道先验去雾算法的改进及 FPGA 实现[J]. 西安理工大学学报, 2016,32(1):77-82. (LIU Guangfei, HU Liaolin. Improvement of dark channel prior defogging algorithm and FPGA implementation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016,32(1):77-82.)
- [10] 王勇. 单幅雾天降质图像复原方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2010. (WANG Yong. Research on restoration method of single foggy degraded image[D]. Hefei,China:Hefei University of Technology, 2010.)
- [11] 嵇晓强. 图像快速去雾与清晰度恢复技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012. (YAN Xiaoqiang. Research on Image Fast Dehazing and Sharpness Restoration Technology [D]. Beijing:University of Chinese Academy of Sciences, 2012.)
- [12] 孙抗,汪渤,周志强,等. 基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2011,31(7):810-813. (SUN Kang,WANG Bo,ZHOU Zhiqiang,et al. Research on real-time image dehazing technology based on bilateral filtering[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2011,31(7):810-813.)
- [13] 贾建芳,李众,郭相凤. 基于成像模型提高雾天图像清晰度的方法:中国,103440623A[P]. 2013. (JIA Jianfang,LI Zhong, GUO Xiangfeng. Method for improving the definition of foggy image based on imaging model:China,103440623A[P]. 2013.)
- [14] 张红英,刁扬桀,吴亚东,等. 一种实时视频去雾方法:中国,104253930B[P]. 2017. (ZHANG Hongying,DIAO Yangjie, WU Yadong,et al. A real-time video dehazing method:China,104253930B[P]. 2017.)
- [15] 甘佳佳,肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾[J]. 中国图象图形学报, 2013,18(5):583-590. (GAN Jiajia, XIAO Chunxia. Fast dehazing of images calculated by combining accurate atmospheric scattering graphs[J]. Journal of Image and Graphics, 2013,18(5):583-590.)

表 1 不同平台与算法处理时间

Table1 Process time of different platforms and algorithms		
	PC operation time/s	SoPC operation time/s
soft matting	1.63	-
guided filter	0.63	0.042

## 作者简介:



刘金华(1972-),女,黑龙江省佳木斯市人,硕士,主要研究方向为应用电子.email:liujinh@163.com.

安必义(1996-),男,贵州省遵义市人,在读本科生,主要研究方向为 FPGA 应用.

韦家军(1994-),男,广西壮族自治区来宾市人,在读硕士研究生,主要研究方向为图像信号处理.

孙梧雨(1994-),男,四川省南充市人,在读硕士研究生,主要研究方向为信号处理与信息系系统.

任雪美(1996-),女,成都市人,在读本科生,主要研究方向为图像处理算法.

廖鹏(1992-),男,成都市人,在读硕士研究生,主要研究方向为信号处理与 FPGA 应用技术.

(上接第 304 页)

- [21] JOSPHIN A M,AMALARATHINAM D I G. Dynamic task duplication based scheduling algorithm for multiprocessor system[C]// Computing and Communication Technologies. Tiruchirappalli,India:IEEE, 2017:271-276.
- [22] 袁仕继,刘志华,黄文晶,等. 一种面向多核处理器高效并行的 Montgomery 加密算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):397-401. (YUAN Shiji,LIU Zhihua,HUANG Wenjing,et al. An efficient parallel Montgomery cryptography algorithm for multi-core processor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3): 397-401.)
- [23] 周娜琴. 分布式环境下异构多处理机的相关任务的调度方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2017. (ZHOU Naqin. Research on scheduling methods of heterogeneous multiprocessor tasks in distributed environment[D]. Guangzhou,China: South China University of Technology, 2017.)
- [24] 田国忠. 多 DAG 共享资源调度的若干问题研究[D]. 北京:北京工业大学, 2013. (TIAN Guozhong. Research on several problems of multi-DAG shared resource scheduling[D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2013.)

## 作者简介:



王学成(1994-),男,安徽省六安市人,在读硕士研究生,主要从事信号处理异构系统研究与设计.email:iota9411@foxmail.com.

马金全(1975-),男,甘肃省天水市人,博士,副教授,主要从事软件无线电技术的研究与开发.

李建军(1967-),男,河南省淇县人,高级实验师,主要从事检测与自动化控制技术研究.