

# 视频图像去雾算法的自适应机制设计及FPGA加速实现

汤勇明<sup>\*①②</sup> 戴荣时<sup>①</sup> 俞峰<sup>①</sup> 王天鹏<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(东南大学电子科学与工程学院 南京 210096)

<sup>②</sup>(光电控制技术重点实验室 洛阳 471009)

**摘要:** 该文提出了一种自适应图像去雾算法,充分考虑不同复杂场景下的图像特征,建立了算法的自适应机制。该机制包含对图像是否有雾、是否为天空区域、滤波器尺寸等的自适应调整,解决了传统图像去雾算法在深度断层处可能产生的光晕效应等问题。该文同时对上述自适应图像去雾算法进行FPGA加速实现,实验结果表明,该文算法在XC7K325T型号FPGA视频处理平台上可以满足对1080P@60Hz视频去雾的实时性要求。对于大多数轻雾或浓雾场景,该文算法去雾后图像色彩自然无过饱和,全局对比度和饱和度提升比率均值为0.309和0.994,相比于本领域其他去雾算法优势明显。

**关键词:** 视频图像去雾; 自适应机制; 实时性去雾; FPGA实现

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)09-2542-10

DOI: 10.11999/JEIT200554

## Design of Adaptive Video Image Dehazing Algorithm and FPGA Accelerated Implementation

TANG Yongming<sup>①②</sup> DAI Rongshi<sup>①</sup> YU Feng<sup>①</sup> WANG Tianpeng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

<sup>②</sup>(Science and Technology on Electro-optic Control Laboratory, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** This paper proposes an adaptive image dehazing algorithm, which fully considers the image features in different complex scenes and establishes an adaptive mechanism of the algorithm. The mechanism includes adaptive adjustments to whether the image is foggy, whether it is a sky area, or filter size, etc., which solves the bad effect that the traditional algorithm may cause when dehazing the depth mutation region. This article also implements FPGA acceleration for the adaptive image dehazing algorithm. Experimental results show that the algorithm can meet the real-time requirements of 1080P@60Hz video dehazing on XC7K325T FPGA video processing platform. For most light fog or heavy fog scenes, the image color of this algorithm is naturally free of oversaturation after dehazing. The average global contrast and saturation enhancement ratio are 0.309 and 0.994, which has obvious advantages compared with other dehazing algorithms in the field.

**Key words:** Video dehaze; Adaptive mechanism; Real-time dehaze; Implementation on FPGA

### 1 引言

图像去雾在交通系统、安防领域、遥感监测、无人机技术和航运海事等诸多领域有着广泛的应用,通过对原始输入图像的去雾可以有效增加人类从图像上获取的信息量。现阶段已公开的去雾算法从策略上可分为基于图像增强去雾、基于图像恢复去雾和基于机器学习去雾。图像增强去雾一般具有

算法简单实时性好的特点,但主要关注点在对比度增强和信息量的提升,而往往忽视了色彩还原度和局部细节处理;图像恢复算法通常具有较好的色彩还原度,但是算法通常较为复杂,难以做到实时处理,常用于单张图像去雾。近年来机器学习技术发展火热,有学者提出通过机器学习方法进行去雾,取得了较好的去雾效果<sup>[1]</sup>。

在实际应用中,图像去雾效果不仅取决于算法的优劣,还和处理平台有密切关系。当前主流的去雾平台包括CPU, GPU和FPGA等。CPU的串行执行特点严重制约了其处理速度, GPU并行计算的特点适合于数据运算规则性强且数据吞吐量较大的计算场合,被较多应用于图像处理和机器学习领

收稿日期: 2020-07-06; 改回日期: 2021-06-21; 网络出版: 2021-08-09

\*通信作者: 汤勇明 tym@seu.edu.cn

基金项目: 航空科学基金(20155169017)

Foundation Item: Aeronautical Science Foundation of China (20155169017)

域，但GPU功耗较高且价格较高，并不适合在边缘计算场合进行部署。FPGA作为可重构器件的一种，提供了丰富的可编程逻辑资源<sup>[2]</sup>，因其灵活可编程、并行计算和能效比较高的特点在图像处理领域被广泛使用，基于FPGA的去雾算法及其优化已成为图像去雾研究方向的热点之一。

本文在图像去雾算法的理论研究基础上提出了一种基于FPGA的自适应图像去雾算法，工作要点包括：(1) 在充分考虑多类复杂场景的情况下，建立了图像去雾算法的自适应机制，分为图像中是否有雾自动判定机制、是否天空区域判定机制以及对算法实现过程中滤波器尺寸参数的自适应调整机制；(2) 对上述图像去雾算法在FPGA硬件平台上进行编程实现和加速优化，满足1080P@60Hz格式输入视频流的实时去雾。

2009年，He等人<sup>[3]</sup>提出基于暗通道先验理论的图像去雾方法，该理论表明室外无雾图像不包含天空的局部区域中，总有一些像素在RGB 3个通道中的至少一个通道具有非常低的强度，这些通道被称为“暗通道”。经过大气光估计、传播图估计、传播图细化和图像恢复4个处理过程之后，去雾后图像质量得到了明显提升，同时暗通道理论的应用使得去雾算法复杂度进一步降低。在暗通道先验理论的基础上，相关学者提出了相应的改进优化算法，主要从大气光的估计和传播图的估计两个角度进行改进。Tan<sup>[4]</sup>认为在大多数恶劣天气中，可以忽略日光的存在，并假设大气光值是全局恒定的，因此他们取整张带雾图像暗通道中亮度最高的像素点作为全局大气光估计值。文献<sup>[3]</sup>认为这种策略容易受到局部异常点的影响，譬如白色汽车表面反射的光强甚至超过天空区域光线的强度，因此他们通过统计暗通道图中强度最高的0.1%像素点值取平均作为全局大气光估计值。杨爱萍等人<sup>[5]</sup>使用基于低通滤波器的方法估计环境中的大气光，结合夜间雾天成像模型，夜间去雾效果显著。Shiau等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于灰度图与传播图相似度的加权策略，加权后传播图的边缘和原图边缘吻合良好，有效消除了光晕效应。但该加权计算方法一定程度上高估了部分像素点的暗通道值，导致恢复后图像色彩还原度不佳，整体图像偏暗。杨燕等人<sup>[7]</sup>使用扇形模型，通过对亮通道与暗通道图像使用均值不等式进行逼近，以获得更好的透射率估计值，从而较为清晰地自然地去雾。

随着人工智能技术的发展，人们想到用机器学习的方式来学习去雾过程中难以确定的超参数，来实现较好的去雾效果。Engin等人<sup>[8]</sup>提出了名为

“Cycle-Dehaze”的单图像除雾网络，该网络可直接对原始带雾图像处理并输出处理后去雾图像，而无需估算大气散射模型相关参数。算法通过结合周期一致性和感知损失来增强CycleGAN<sup>[9]</sup>公式鲁棒性，以提高纹理信息恢复的质量并生成更契合人类感知的无雾图像。Cai等人<sup>[10]</sup>使用端到端的神经网络Dehaze-Net，其结构包含特征提取，非线性映射，多尺度特征图的提取与映射，BRelu激活，来生成传播函数图的估计，并带入大气光散射模型计算，得到去雾后的效果图。Li等人<sup>[11]</sup>同样基于大气光散射模型，通过数学变换将该模型中的传播函数图与大气光值合并为一个超参数，并提出使用端到端的神经网络AOD-Net对该超参数进行学习，该轻量化的神经网络模型可以达到较好的去雾效果，并能与其他物体识别与检测算法有效级联。Ren等人<sup>[12]</sup>使用门控融合网络的方法进行单张图像去雾，通过对原始输入图像分别进行自平衡，对比度增强和Gamma校正，并使用多尺度卷积神经网络对生成的3张图像进行融合，可以对输入图像进行端到端的映射，达到对单张图像的良好去雾效果。同年，Zhang等人<sup>[13]</sup>使用稠密连接的多尺度金字塔结构神经网络DCPDN来估计传播函数和大气光值，并引入生成对抗的思想对去雾后的图像进行真假判定，以此来提高去雾的效果。

## 2 本文算法

### 2.1 自适应图像去雾算法的带雾判定机制

虽然多数去雾算法对带雾图像具有良好的去雾效果，但鲜有算法提出雾霾预先识别机制，而在实际的产品应用中对自适应去雾场景需求较多，因此去雾算法中自适应机制的建立显得尤为重要。在晴朗天气下拍摄的户外图像成像质量一般较好，无需执行去雾操作，不必要的去雾操作可能会造成成像效果的下降。本文参考颜色衰减先验理论<sup>[1]</sup>，通过对饱和度参数的分析判定图像是否带雾，并以此来建立自适应去雾机制。图1所示为部分图像的饱和度概率分布图，左侧两图为晴朗天气下的拍摄图像，其饱和度分布遍及0~1整个区间，且主要集中于较高饱和度值；图1(c)为薄雾天气下的拍摄图像，其饱和度分布虽然遍及整个区间，但主要集中于较低饱和度值；图1(d)为浓雾天气下的拍摄图像，可以看出饱和度值几乎全部分布于较低值区间。

实验经过大量图像分析比较：对于晴朗或无雾天气下的图像，其饱和度值分布较为均匀；对于有雾状态下的图像，其饱和度分布主要集中于低值区域，随着雾气浓度增加，饱和度值分布更加集中。考虑到天空区域的饱和度很低，因此在计算全局饱

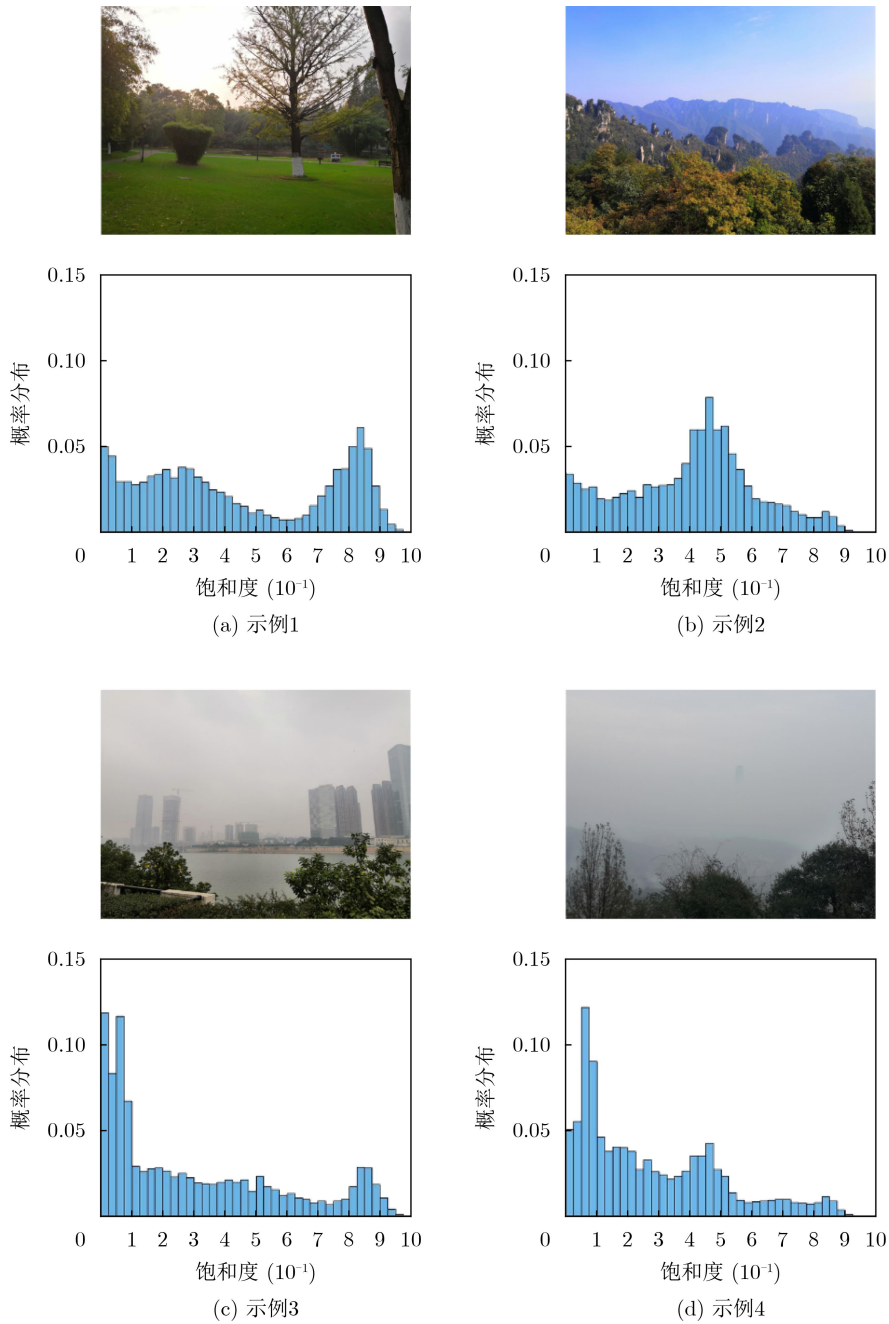


图1 饱和度归一化直方图

和度时去除天空区域。故定义单幅图像全局饱和度计算公式为

$$S = \frac{1}{mn - \text{sum}(\text{sky})} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (1 - \text{sky}_{ij}) \cdot \frac{\max(R_{ij}, G_{ij}, B_{ij}) - \min(R_{ij}, G_{ij}, B_{ij})}{\max(R_{ij}, G_{ij}, B_{ij})} \quad (1)$$

其中，输入图像尺寸为 $m, n$ ,  $\text{sky}$ 表示天空区域像素点，所有被标记为天空区域的像素其 $\text{sky}$ 值为1。本文分别对无雾、有薄雾、有浓雾的各30张户外图像进行统计，其全局饱和度值的概率分布函数如图2所示。

从统计结果可以看出，无雾图的全局饱和度值

分布于 $0.1 \sim 0.6$ ，超过 $0.2$ 的概率为 $0.97$ ；薄雾图的全局饱和度分布于 $0.05 \sim 0.5$ ，低于 $0.2$ 的概率为 $0.87$ ；浓雾图的全局饱和度分布于 $0 \sim 0.25$ ，低于 $0.2$ 的概率为 $0.96$ 。故本实验中将全局饱和度低于 $0.2$ 的图像视为带雾图像，反之为正常图像，输出原图。

### 2.2 自适应图像去雾算法的天空区域判定

上述的自适应去雾机制依赖于式(1)中对全局图像的饱和度判定，所以算法需要对天空区域进行严谨的识别判断。天空区域的像素具有局部区域内像素梯度值较低且像素强度值较高、分布均匀的特

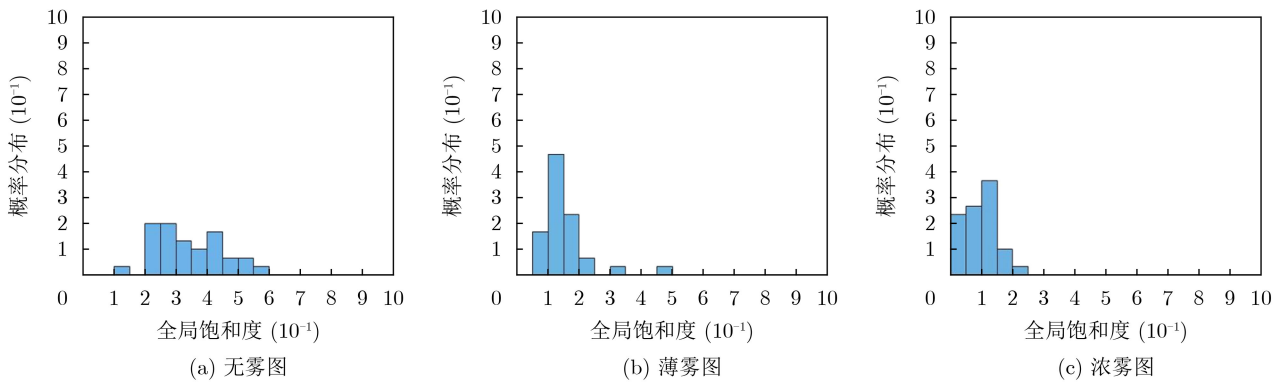


图2 全局饱和度归一化直方图

点。因此，对天空区域的标定步骤为：(1)对所有像素点的RGB三通道分别求2维梯度，三通道梯度均低于设定阈值(0.03)，认为该像素点为疑似天空区域；(2)对所有疑似天空区域像素点的RGB三通道分别求平均值，得到疑似天空区域的RGB三通道平均强度；(3)疑似天空区域像素点如果满足RGB三通道值和步骤(2)求得的平均值的比值均高于设定阈值(0.85)，则认为当前像素点为天空区域像素点。分割效果如图3所示。

算法初步运行后发现天空区域有部分噪点产生，且分布较为稀疏，噪点能量较小。本文采用形态学运算去除细节噪点。对步骤(3)生成的二值化图进行开运算，效果如图4所示。由于雾天天空区域无色彩且噪点较多，去雾不当反而容易引起过饱和和现象，因此算法对天空区域图像做直接输出处理，其余的图像均进行标定，代入式(1)进行计算，进而判定目标图像是否为带雾图像。

### 2.3 自适应图像去雾算法的模型构建

当确定输入图像需要执行去雾操作时，算法将



图3 天空区域初步检测



图4 形态学运算处理

执行图像自适应去雾操作，去雾操作的执行依赖于以下模型的构建。基于对大气光模型的分析，Bouguer衰减定律得出传播路径中总光谱辐照度 $E(d, \lambda)$ 为

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda)e^{-\beta(\lambda)d} \quad (2)$$

其中， $E_0(\lambda)$ 代表 $x=0$ 处的反射光辐照度，大气散射系数为 $\beta(\lambda)$ ，物体与观察者距离为 $d$ 。式(2)描述了平行光线通过均匀大气后的剩余强度，因此物体指向观察者方向的辐射率 $L(d, \lambda)$ 为

$$L(d, \lambda) = L_0(\lambda)e^{-\beta(\lambda)d} \quad (3)$$

其中， $L_0(\lambda)$ 是 $d=0$ 处的反射光辐射率。场景物体散射效应和大气光散射效应是线性相加的<sup>[14]</sup>。设大气环境光强为 $A$ ，物体反射光在观察者方向的光强为 $J(x)$ ，根据式(3)，观察者接收到该物体的光强 $I(x)$ 为

$$I(x) = J(x) \cdot e^{-\beta(\lambda)x} + A \cdot (1 - e^{-\beta(\lambda)x}) \quad (4)$$

由式(4)可知，在已知输入带雾图像的前提下，恢复无雾图像仅需计算大气光强 $A$ 和物体反射光传播函数 $t(x) = e^{-\beta(\lambda)x}$ 。首先做如下两点假设：(1)大气光值 $A$ 均匀且为一常量，其在RGB3个通道的强度近似相同。(2)图像在以像素 $x$ 为中心的局部区域 $\Omega(x)$ 内传播函数 $\tilde{t}(x)$ 近似保持不变。

### 2.4 自适应图像去雾算法的大气光值估计

大气光值估计的准确度决定了恢复图像的整体亮度和色彩饱和度。假设待处理图像尺寸为 $m \times n$ ，本文按如下步骤估计大气光：(1)统计待处理图像的暗通道中亮度最高的0.1%像素点，取其均值作为大气光值的初步估计值 $A_0$ 。(2)设 $l$ 为像素灰度值， $\varphi$ 为平滑度阈值， $\eta$ 为亮度阈值。遍历每个像素点，若以该像素点为中心的 $3 \times 3$ 邻域内所有像素点都满足平滑条件和亮度条件： $|l(\Omega_{xy}) - l(x, y)| < \varphi$ ， $|\frac{l^c}{c \in \{R, G, B\}}(x_0, y_0) - A_0| < \eta$ ，则认为该点是参考点。(3)将步骤(2)中所有参考点的灰度平均值作为最终的大气光估计值 $A$ 。在本文中，取 $\varphi$ 为0.03， $\eta$ 为0.15。

## 2.5 自适应图像去雾算法的传播函数估计

根据暗通道先验理论<sup>[3]</sup>, 对图像的传播函数进行粗略估计, 同时由于实际获取的去雾后图像应当留存有一定粒子散射的影响, 令该影响因子为 $\omega(0 < \omega < 1)$ , 代入式(4)得到如式(5)所示传播函数估计

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \cdot \min_{c \in \{R, G, B\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \left( \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (5)$$

通过调整 $\omega$ 大小可以控制输出图像的雾气保留程度, 其中 $\Omega(x)$ 所代表的以 $x$ 为中心的局部区域中暗通道滤波器尺寸设为 $R_1$ 。

上述步骤得到的是较为粗糙的传播函数, 直接代入式(4)计算会使结果呈现明显的块状效应。所以本算法在粗传播函数的基础上进行了精细化操作, 包含导向滤波和自适应滤波器尺寸调整。He等人<sup>[15]</sup>曾由局部线性模型推导出导向滤波算法。该算法假设滤波输出图像与其参考图像呈局部线性关系, 设输入的参考图像为 $I$ , 输出图像为 $q$ , 在图像局部区域 $\omega_k$ 内 $a_k, b_k$ 为恒定线性因子, 则存在式(6)所示的线性关系

$$q_i = a_k \cdot I_i + b_k, (\forall i \in \omega_k) \quad (6)$$

假设待平滑图像为 $p$ , 为了防止过拟合, 引入正则化因子 $\varepsilon a_k^2$ 。则基于上述线性模型得到的滤波后输出图像和原图像局部差异度可表示为

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

对差异度 $E(a_k, b_k)$ 求最小值, 分别对 $a_k, b_k$ 求偏导, 令 $\text{cov}_k(p, I)$ 为引导图 $I$ 和待平滑图 $p$ 在区域 $\omega_k$ 的协方差,  $\text{var}_k(I)$ 为该区域引导图 $I$ 方差, 求解可得导向滤波输出结果为

$$q_i = \frac{\text{cov}_k(p, I)}{\text{var}_k(I) + \varepsilon} \cdot (I_i - \mu_k) + \bar{p}_k, \forall i \in \omega_k \quad (8)$$

假设其中目标滤波器 $\omega_k$ 中的导向滤波器尺寸为 $R_2$ 。式(8)体现出在目标区域 $\omega_k$ 为平坦区域的情况下, 导向滤波效果呈现出平滑滤波的作用; 在目标区域 $\omega_k$ 为高方差区域的情况下, 输出值为导向图纹理信息和待平滑图像背景信息的叠加, 起到边缘保留作用。为了有效去除粗传播函数的块状效应, 导向滤波算法的滤波器尺寸应该大于暗通道理论中滤波器的尺寸。在本实验中, 设定导向滤波中滤波器尺寸为暗通道滤波器尺寸的2倍。若两者尺寸近似, 则将会有明显的块状效应, 若尺寸相差过大将导致图像暗通道取值不能匹配当前滤波窗口, 故选取为2倍, 即

$$R_2 = 2 \times R_1 \quad (9)$$

## 2.6 滤波器尺寸的自适应调整

导向滤波算法的执行效果与原始图像的特征有关。在深度连续区域, 由于像素亮度值分布较为平坦, 采用较大采样尺寸的暗通道滤波器将会更高概率获得暗像素, 从而准确地计算传播函数。同时较大的滤波器尺寸在导向滤波运算时能有效避免噪点像素的影响, 鲁棒性更强。在深度断层区域, 由于像素亮度值分布不均, 暗通道滤波器的采样窗口较小, 一方面能避免采集到另一层平面的暗像素, 另一方面在导向滤波运算时受到另一层平面像素值影响更小, 从而避免产生严重的光晕效应。基于上述分析, 自适应去雾算法中的滤波器尺寸需要依据像素局部特征做自适应调整。本文实验首先对预处理的图像进行边缘像素的检测。对于一个确定像素点 $(x, y)$ , 若其局部区域 $\Omega_{xy}$ 内不存在边缘像素, 则认为该局部区域为平坦区域。反之, 缩小局部区域的尺寸, 直到该局部区域中不存在边缘像素, 或者局部区域的尺寸已经达到了算法预设的最小值。

在实验中, 本文首先使用sobel算子对输入的图像做边缘提取, 对边缘像素进行标定, 并预设最大局部区域为尺寸 $15 \times 15$ 的矩形区, 则使得以像素点 $(x, y)$ 为中心的局部区域为平坦区域的最大取值 $r, r \leq 15$ 作为当前像素点的滤波器尺寸取值。同时预设最小局部区域的尺寸为 $3 \times 3$ , 经过自适应调整后的滤波器尺寸将直接使用到传播函数的粗估计中, 代入式(9)计算后在导向滤波中继续使用。

综合以上内容, 自适应图像去雾算法流程图如图5所示。

## 2.7 自适应图像去雾算法的FPGA实现

为了验证本算法在边缘计算平台的实用性和可部署性, 本文对自适应图像去雾算法进行了FPGA

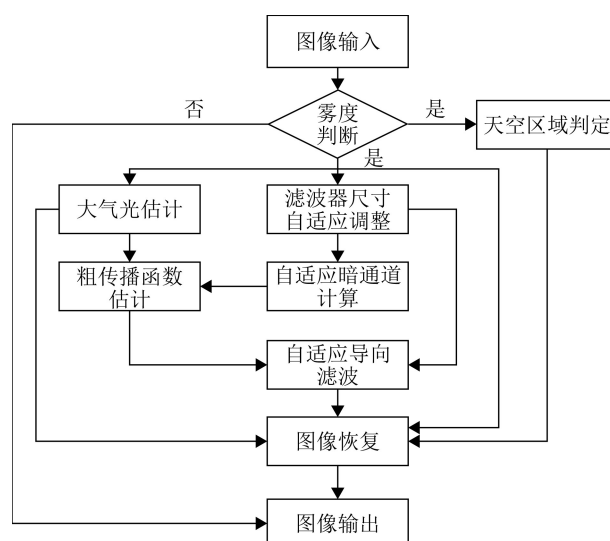


图5 自适应图像去雾算法流程图

实现。验证平台采用Xilinx公司XC7K325T芯片为核心的视频处理板卡，使用VerilogHDL编写代码，目前代码已经开源：[https://github.com/WangTianpengSEU/video\\_dehazing/raw/master/dehaze.zip](https://github.com/WangTianpengSEU/video_dehazing/raw/master/dehaze.zip)。

算法的模块化划分如图6所示。

基于FPGA的程序执行特点，算法的实现主要由不同模块之间的并行执行来完成。由于该文去雾算法的实现需要高吞吐数据量的读写操作，采用DDR来实现较为快速的数据交互，并严格遵循静态时序分析理论<sup>[16]</sup>，对高速时钟路径进行时序约束，对程序执行的带宽进行合理分配。数据处理通路的搭建如图6所示，相较于其他实现效果较先进的神经网络算法，本文算法采用FPGA实现，可以做到在嵌入式平台的边缘侧实时处理。设计的模块化以及部署平台的可编程性都为算法的后续改进和应用带来更大的灵活性和适配度。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 自适应图像去雾算法的是否有雾判定

本文为了更准确地判定算法识别带雾图像的能力，按照雾气的遮罩严重程度将待测试图像分为无雾图、薄雾图和浓雾图<sup>图3</sup>类分别测试，测试数量各50张。测试图主要从日常拍摄以及网上图库等渠道获取，测试结果如表1所示，其中效果不佳的识别图像如图7所示。

对未能准确识别的图像进行分析，图7(a)和

图7(d)中存在大面积绿地且近处几乎没有雾气遮罩，图7(c)拍摄地位于山中，雾气分布不均，近处饱和度明显较高，而图7(b)黄土坡色彩丰富且面积较大，提高了图像的全局饱和度。以上结果说明系统对多数带雾图像能够准确识别，但是由于图像之间特征差异较大，因此对于多数无雾图和浓雾图均具有良好的识别效果，薄雾图的特征介于二者之间，其识别率相对偏低，有待其他手段配合提高识别准确率。

#### 3.2 深度断层区域细节测试

已有去雾算法在连续平面通常能取得较好的去雾效果，但对深度断层区域去雾后往往产生光晕效应。本文提出滤波器尺寸自适应调整策略，能够根据图像局部梯度变化识别断层区域并相应调整滤波器尺寸，避免去雾后产生光晕现象。分别对测试对象执行滤波器尺寸固定去雾算法和滤波器尺寸自适应调整去雾算法，对比去雾后图像深度断层细节效果。

根据图8所示的去雾效果，湖面和树林交界边缘为深度断层，滤波器尺寸自适应调整后得到的传播函数图边缘保留良好，有效解决了边缘处光晕效应的产生，因此去雾后得到的图像无明显光晕现象。

#### 3.3 自适应图像去雾算法的结果测试

本文为了避免评价指标单一和主观性对算法效果评估产生影响，分别从天空区域去雾、景物细节去雾、图像整体去雾3个角度进行测试评价，使用

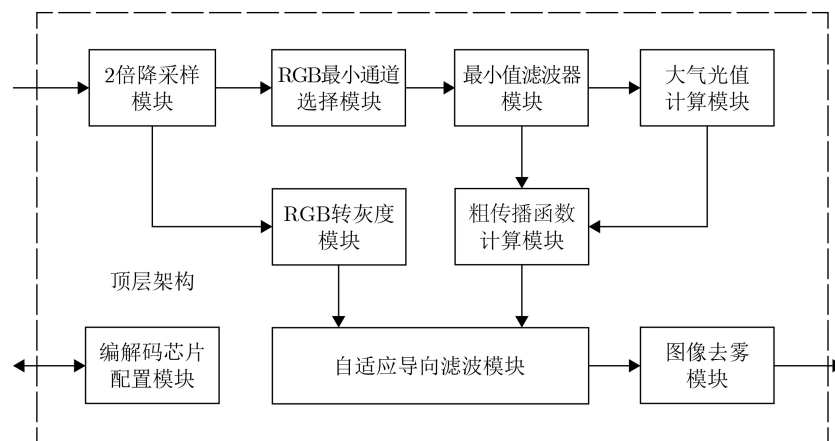


图6 自适应图像去雾算法的FPGA实现模块框架

表1 自适应图像去雾算法的有雾与否判定

图片种类	测试数量	判定需要去雾	判定无需去雾	准确率(%)
无雾图	50	1	49	98
薄雾图	50	46	4	92
浓雾图	50	49	1	98
总体	150	\	\	96

Tan方法<sup>[4]</sup>, He方法<sup>[3]</sup>, Shiau方法<sup>[6]</sup>, Dehaze-Net<sup>[10]</sup>以及AOD-Net<sup>[11]</sup>进行对比,并在测试过程中采用全局饱和度、全局对比度进行评估,结果如表2所示。天空图像的去雾效果如图9(a)所示,景物细节去雾效果如图9(b)所示。并且本文采取真实场景下获得的图像用作效果对比,分别对上述算法进行实验,图像整体去雾如图10所示。

图9(a)的结果表明,对天空执行无差别去雾策略容易受到噪点影响,同时易引发过饱和现象。本文算法能够较好识别天空区域并执行针对性去雾算法,使得执行去雾操作后的天空色彩不失真且无光晕出现。图9(b)的结果表明滤波器尺寸自适应调整策略能够根据图像局部梯度变化识别深度断层区域并相应调整滤波器尺寸,避免去雾后产生光晕现象。



图7 未识别的带雾图像

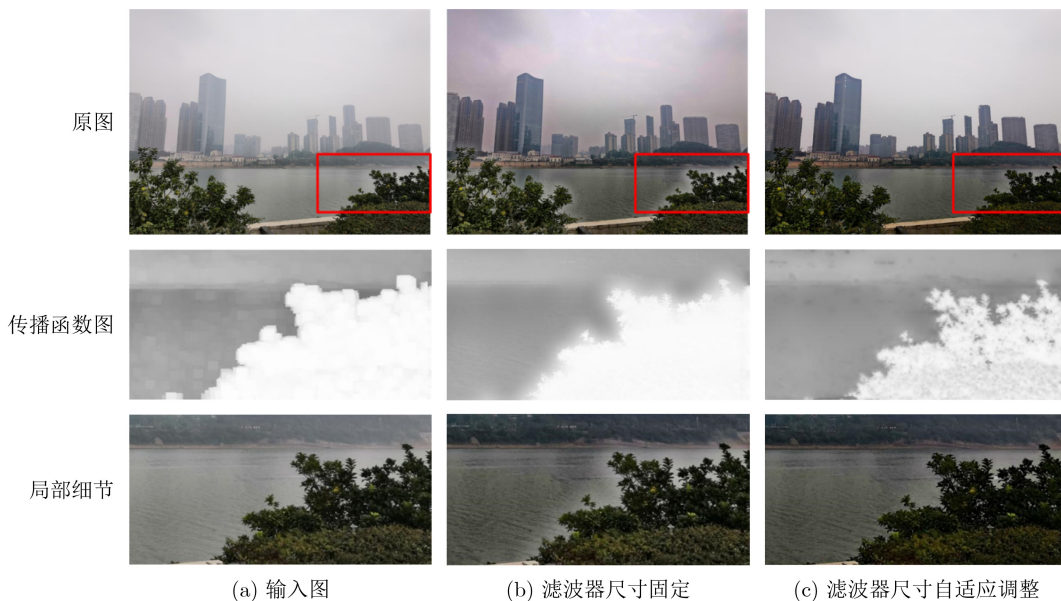


图8 深度断层区域去雾细节展示

表2 原始图像去雾后评价指标统计

		Tan <sup>[4]</sup>	Shiau <sup>[6]</sup>	He <sup>[3]</sup>	AOD-Net <sup>[11]</sup>	Dehaze-Net <sup>[10]</sup>	本文算法
薄雾图	全局饱和度提升比率均值	0.432	0.950	0.668	0.968	0.617	1.037
	全局对比度提升比率均值	0.891	0.631	0.613	1.255	0.797	0.615
浓雾图	全局饱和度提升比率均值	0.723	0.613	0.398	0.858	0.859	0.786
	全局对比度提升比率均值	0.254	0.299	0.374	0.571	0.119	0.379



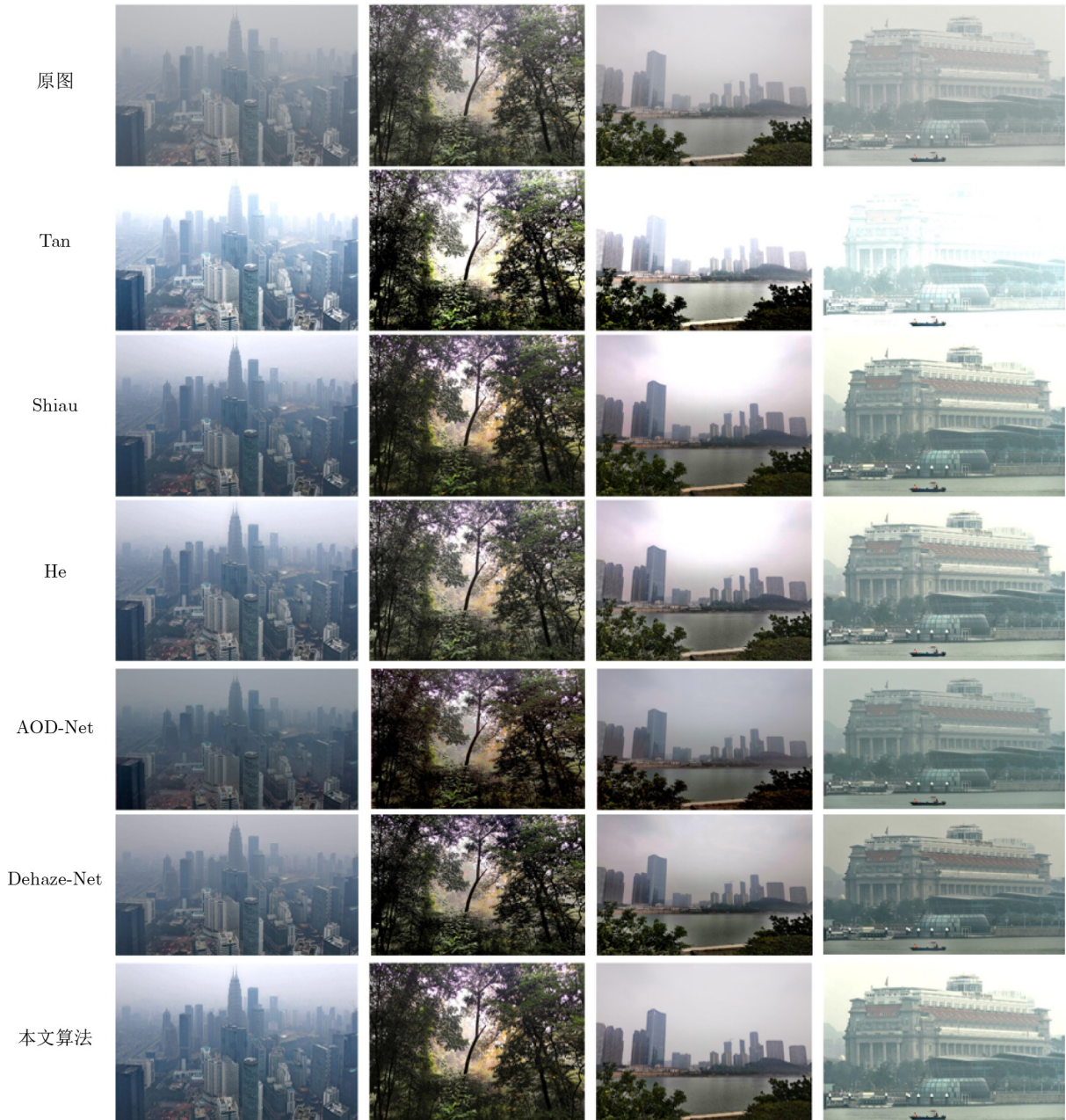


图 10 图像整体去雾效果

表 3 自适应图像去雾算法加速和硬件加速对比

分辨率	He <sup>[9]</sup> (CPU)	本文算法(CPU)	本文算法(FPGA)
800×463	1090	220 (4.9X)	2.85 (382X)
1200×800	2960	500 (5.9X)	7.4 (400X)
1920×1080	6393	1080 (5.9X)	16 (399X)

### 3.4 FPGA视频去雾的结果测试

本文通过视频播放器将雾天户外多个场景下采集的1080P@60Hz格式视频依次通过HDMI接口输入FPGA硬件板卡,输出至显示屏,视频播放平滑流畅,去雾成效明显,满足视频实时性处理需求,

完整视频去雾演示视频已公开,如下:[https://v.youku.com/v\\_show/id\\_XNDYwNDcxODMxNg==.html](https://v.youku.com/v_show/id_XNDYwNDcxODMxNg==.html)。

## 4 结论

本文在现有的图像去雾算法基础上,设计并实现了基于FPGA的自适应图像去雾算法。针对不同场景建立了自适应去雾机制,并通过对去雾过程中去雾参数的自适应调整解决了传统图像去雾算法中可能出现的光晕现象,算法具有较好的普适性。本文还对该算法在FPGA端进行编程实现和加速优化,结果表明,与以往算法相比去雾效果优秀,且

该算法在FPGA侧能实时处理1080P@60Hz的输入图像, 为今后视频实时去雾广泛应用和芯片集成化设计奠定了基础。

### 参考文献

- [1] ZHU Qingsong, MAI Jiaming, and SHAO Ling. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522–3533. doi: [10.1109/TIP.2015.2446191](https://doi.org/10.1109/TIP.2015.2446191).
  - [2] 汤勇明, 张圣清, 陆佳华. 搭建你的数字积木: 数字电路与逻辑设计(Verilog HDL&Vivado版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017: 12.  
TANG Yongming, ZHANG Shengqing, and LU Jiahua. Build Your Digital Blocks: Digital Circuits and Logic Design Using Verilog HDL & Vivado[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 12.
  - [3] HE Kaiping, SUN Jian, and TANG Xiaou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341–2353. doi: [10.1109/TPAMI.2010.168](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2010.168).
  - [4] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Anchorage, USA, 2008: 1–8.
  - [5] 杨爱萍, 王南, 庞彦伟, 等. 人工光源条件下夜间雾天图像建模及去雾[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).  
YANG Aiping, WANG Nan, PANG Yanwei, et al. Nighttime haze removal based on new imaging model with artificial light sources[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(6): 1330–1337. doi: [10.11999/JEIT170704](https://doi.org/10.11999/JEIT170704).
  - [6] SHIAU Y H, CHEN P Y, YANG H Y, et al. Weighted haze removal method with halo prevention[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2014, 25(2): 445–453. doi: [10.1016/j.jvcir.2013.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.12.011).
  - [7] 杨燕, 王志伟. 基于均值不等关系优化的自适应图像去雾算法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(3): 755–763. doi: [10.11999/JEIT190368](https://doi.org/10.11999/JEIT190368).  
YANG Yan and WANG Zhiwei. Adaptive image dehazing algorithm based on mean unequal relation optimization[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 755–763. doi: [10.11999/JEIT190368](https://doi.org/10.11999/JEIT190368).
  - [8] ENGIN D, GENÇ A, and EKENEL H K. Cycle-Dehaze: Enhanced CycleGAN for single image dehazing[C]. Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Salt Lake City, USA, 2018: 938–946.
  - [9] ZHU Junyan, PARK T, ISOLA P, et al. Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks[C]. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Venice, Italy, 2017: 2242–2251.
  - [10] CAI Bolun, XU Xiangmin, JIA Kui, et al. DehazeNet: An end-to-end system for single image haze removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(11): 5187–5198. doi: [10.1109/TIP.2016.2598681](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2598681).
  - [11] LI Boyi, PENG Xiulian, WANG Zhangyang, et al. An all-in-one network for dehazing and beyond[J]. *arXiv:1707.06543*, 2017.
  - [12] REN Wenqi, MA Lin, ZHANG Jiawei, et al. Gated fusion network for single image dehazing[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, USA, 2018: 3253–3261.
  - [13] ZHANG He and PATEL V M. Densely connected pyramid dehazing network[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, USA, 2018: 3194–3203.
  - [14] MIDDLETON W E K. Vision Through the Atmosphere[M]. Toronto: University of Toronto Press, 1952.
  - [15] HE Kaiping, SUN Jian, and TANG Xiaou. Guided image filtering[C]. Proceedings of the 11th European Conference on Computer Vision, Heraklion, Greece, 2010: 1–14.
  - [16] 刘晟. FPGA静态时序约束的策略研究及探讨[J]. 通信技术, 2019, 52(8): 2038–2043. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2019.08.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2019.08.042).  
LIU Sheng. Strategy research and discussion on FPGA static timing constraints[J]. *Communications Technology*, 2019, 52(8): 2038–2043. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2019.08.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0802.2019.08.042).
- 汤勇明: 男, 1973年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为显示电子学、嵌入式系统应用、FPGA加速设计。  
戴荣时: 男, 1997年生, 硕士生, 主要研究方向为数字图像处理、FPGA加速设计。  
俞峰: 男, 1997年生, 硕士生, 主要研究方向为数字图像处理、FPGA编程开发。  
王天鹏: 男, 1995年生, 硕士生, 主要研究方向为电路与系统、FPGA加速设计。

责任编辑: 陈倩