

# 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法

代书博<sup>1,2</sup>, 徐 伟<sup>1</sup>, 朴永杰<sup>1</sup>, 陈彦彤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对雾天条件下获得的遥感图像清晰度、对比度和色彩保真度下降, 继而影响遥感图像后续应用的问题, 考虑到遥感图像数据量大、景深变化小、几乎不含有天空区域的特点, 提出一种改进的基于暗原色先验规律的遥感图像快速去雾方法。在保证去雾效果的前提下, 对原暗原色先验去雾算法做出了针对性的改进, 采用直接求取每个像素点 r、g、b 三个颜色通道强度值的最小值来获取图像的暗原色图, 该方法大幅降低了算法的复杂度, 避免了繁重的计算。实验结果表明, 改进的去雾算法能够快速有效地去除雾对遥感图像的干扰, 提高图像清晰度, 还原景物真实色彩, 处理时间仅为原算法的 2%, 可以满足遥感图像实时处理的要求。

**关键词** 遥感; 去雾; 暗原色先验; 实时处理

**中图分类号** TP391.9 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0328002

## Remote Sensing Image Defogging Based on Dark Channel Prior

Dai Shubo<sup>1,2</sup>, Xu Wei<sup>1</sup>, Piao Yongjie<sup>1</sup>, Chen Yantong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at solving the problems of remote sensing images with poor clarity, contrast and color fidelity in foggy weathers, a rapid defogging method using dark channel prior is proposed based on the characteristics of large amount of data, small changes in depth and almost no area of the sky. To ensure the performance of defogging, the dark channel image is obtained by calculating the minimum value of r, g, b channels. It significantly reduces the complexity and avoids heavy computation. Experimental results demonstrate that the improved algorithm can remove the haze effectively. It can enhance the definition and color of hazy degraded image, and the processing time is 2% of the original method. The proposed algorithm can satisfy the requirement of real-time remote sensing image processing.

**Key words** remote sensing; defogging; dark-channel prior; real-time processing

**OCIS codes** 280.1310; 100.2000; 100.2980; 100.3020

## 1 引 言

光学遥感成像往往会受到雾霭天气的影响, 造成景物辨识度下降、对比度降低、细节信息不明显及色彩偏移等退化现象, 使得光学遥感成像数据可用率降低, 从而影响目标识别、灾情侦察、遥感导航、土地测绘等系统效用的发挥<sup>[1-2]</sup>。因此, 对雾霭天气条件下的遥感图像进行有效地去雾处理以提高遥感数据的有效性具有重要意义。

雾实质上是由悬浮在大气中的微小液滴与空气中的微小粒子相互粘结而形成的气溶胶分子。雾天条件下, 景物反射的光线在传播到成像设备的过程中, 会与大气中粒子半径较大的气溶胶分子发生交互作用, 导

**收稿日期:** 2016-08-22; **收到修改稿日期:** 2016-10-29

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(61503360)

**作者简介:** 代书博(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: daishb1991@163.com

**导师简介:** 徐 伟(1981—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事星载一体化卫星技术及高可靠一体化航天电子学系统等方面的研究。E-mail: xwciomp@126.com

致入射能量以一定的规律在各个方向重新分布,从而引起光线的颜色和强度等特征发生改变<sup>[3-4]</sup>。而大气中的气溶胶分子对可见光的散射作用是导致可见光波段图像降质的主要原因<sup>[5]</sup>。

目前,主流的图像去雾方法主要分为两类:1)基于非模型的去雾方法,又称为图像增强方法。该方法在处理时并不需要考虑图像退化的原因和模型,只需根据特定的需求,采用常规的图像增强手段来改善图像的视觉效果,该方法并不是从光学成像本质上实现去雾,如文献[3]通过扩大图像的对比度来达到去雾效果;2)基于模型的去雾方法,又称为图像复原方法。该方法利用图像退化的机理和先验知识,从光学成像本质上实现去雾处理。文献[5]通过估算景物的反射率来推断反射光线在空气中传播时的透射率;He等<sup>[2]</sup>提出了暗原色先验单幅图像去雾方法,该算法能够达到很好的去雾效果。算法中采用软抠图法对透射率图进一步修复,但软抠图法的实现过程是基于大规模稀疏矩阵运算,这给去雾算法带来了巨大的运算量,同时将会耗用大量的处理器内存,使得算法具有较高的时间复杂度和空间复杂度。对此,庞春莹等<sup>[6]</sup>提出采用双边滤波代替软抠图法修复透射率图;王卫星等<sup>[7]</sup>提出采用最小值滤波和引导滤波相结合的方法来修复透射率图。虽然以上改进算法的复杂度都较原算法有所减小,但在处理数据量大的遥感图像时仍无法达到实时处理的要求。

本文结合暗原色先验规律,并针对遥感图像的特点,提出了一种适用于遥感图像的去雾方法。在保证去雾效果的前提下,最大限度地减少算法的运算量,并使其适用于现场可编程门阵列(FPGA)硬件实现,将整个算法的处理时间降低到原算法的2%,可以满足遥感图像实时处理的要求,实现了遥感图像的快速有效去雾处理。

## 2 雾天图像退化的物理模型

本文选用目前计算机视觉及计算机图形领域应用最广泛的模型——McCartney大气散射模型<sup>[8-10]</sup>作为雾天图像退化的物理模型,该模型揭示了雾天图像退化的机理,是实现图像去雾的主要理论依据。

McCartney模型将一个像素点的色彩和强度看作是由雾霾等天气状况下大气光产生的色彩和强度与晴天天气状况下所观察的场景像素点的色彩、强度的线性组合。该模型可描述为

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

式中 $x$ 表示像素点的坐标, $I(x)$ 表示观测到的有雾图像的光强度,即 $I$ 表示带雾图像; $J(x)$ 表示去雾后的场景光线强度,即 $J$ 表示复原的无雾图像; $t(x)$ 表征了光线穿透大气媒介的能力,描述的是光线通过大气媒介传播到成像设备的过程中没有被散射的部分; $A$ 为全局常量,表示全球大气光成分。方程右边的第一项 $J(x)t(x)$ 称作直接衰减项,描述的是景物反射的光线在传播媒介中经过衰减后的部分;第二项 $A[1 - t(x)]$ 描述的是由周围环境的入射光与大气粒子发生散射作用而产生的大气光成分,受这部分大气光成分的影响,景物的颜色会产生偏移。

由(1)式分析可知,去雾的目标就是从 $I$ 中复原 $J$ 、 $A$ 和 $t$ 。而(1)式中只有 $I$ 是已知的, $J$ 是待求的, $A$ 和 $t$ 是未知的,显然该方程是一个病态方程,所以要复原得到无雾图像,就需要依赖一个强有力的先验知识或假设。本文以暗原色先验规律这一先验知识作为约束条件来求取方程中的参数,继而复原得到无雾图像。

## 3 暗原色先验规律及其去雾原理

暗原色先验规律是由香港中文大学信息工程系的He等<sup>[2]</sup>提出的。他们通过对大量的户外无雾图像进行统计实验得到了这个经验性规律,即在绝大多数户外无雾图像的非天空局部区域中,都存在一些像素,在这些像素中至少有一个颜色通道的强度值很低,且接近于0,称之为暗原色。对于一幅图像 $J$ ,描述其暗原色表达式为

$$J_{\text{dark}} = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)], \quad (2)$$

式中 $J_{\text{dark}}$ 表示图像的暗原色, $c$ 表示像素点 $r$ 、 $g$ 、 $b$ 三个颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以 $x$ 为中心的局部区域。暗原色先验规律指出,自然景观的投影、景物的阴影、色彩鲜艳的物体或表面及颜色较暗的物体或表面都会造成颜色通道的强度值很低,使这些景物的暗原色总是灰暗的。

由于图像被灰白色的雾霭干扰,导致被雾霭覆盖着的景物的暗原色强度值受大气散射作用的影响而变

得较高,使得有雾部分的暗原色会比无雾部分明亮,透射率减小<sup>[11-13]</sup>。所以,暗原色直接反映了雾浓度大小,并且其强度值和透射率有关,因此,可以利用暗原色来估算透射率。结合雾成像模型,通过减去场景中由于雾的影响而变亮的暗原色所对应的像素点,来去除空间中各向同性的雾,继而还原出无雾图像。

#### 4 改进的暗原色去雾方法

暗原色先验去雾算法在获取图像的暗原色时需要图像进行局部最小值滤波处理,在进行局部滤波处理时,局部块中可能存在畸变点而影响整个区域滤波的结果,如在局部块中可能存在某个很暗的点或者颜色特别鲜艳的点,这个像素点将会直接决定滤波结果,由于每个暗原色像素点影响着多个滤波窗口的运算结果,所以可能影响相邻子块之间的滤波结果,从而造成暗原色图存在一定的块状效应。因为透射率和暗原色有关,所以在通过暗原色获取透射率时,透射率图也会存在一定的块状效应,继而影响复原无雾图像的视觉效果。

另一方面,在分块处理获取暗原色值时,分块的大小也会直接影响透射率的估计并决定最终的去雾效果。分块越小,暗原色值越精确,估测的透射率图细节纹理越多,层次感越好,但平滑效果会减弱;分块越大,获取到的暗原色值稀疏,估测的透射率图细节和层次感都会减弱,但平滑感会有所增强<sup>[14]</sup>。根据文献[2]的理论:块选取的太大对于薄雾或者雾分布相对较均匀情况下的去雾效果不会有太大影响,但在浓雾情况下,去雾效果会有所下降。

针对遥感图像数据量大、雾浓度分布相对较均匀、景深变化小<sup>[15]</sup>且几乎不包含天空区域的特点,同时为了满足实时处理的要求,在保证去雾效果的基础上,本文采用直接求取每个像素点 r、g、b 三个颜色通道强度值的最小值作为该像素点的暗原色强度值,通过逐像素求取暗原色值来获取整幅图像的暗原色图。对于一幅图像  $I$ ,定义

$$I_{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x), x \in I, \quad (3)$$

式中  $x$  表示图像中的每个像素点,  $I_{\text{dark}}$  表示图像的暗原色。

根据文献[2],暗原色先验在图像中包括灰白场景、偏白色物体、水面等大面积较亮的区域时是失效的,而在许多城区遥感图像中,可能存在大面积水泥路面、建筑物白色顶面或反光性较强的灰白景物,如果不对这些区域进行处理,而直接根据求取的暗原色来估算透射率和大气光,将会对去雾效果产生严重影响。为了达到更好的去雾效果,同时不失本文方法的普适性,本文在获取暗原色的过程中通过对暗原色进行阈值分割来减小失效区域的影响。如果像素点的暗原色值大于阈值,则认为该像素点在失效区域中,并直接将其暗原色值赋值为阈值。通过对多幅图像的失效区域中像素强度值的提取,得到最佳的阈值选取区间为 [235, 245]。本文选取暗原色的阈值为 245。

##### 4.1 透射率的获取

根据雾成像模型,要复原无雾图像,首先要假定大气光因子  $A$  是给定的,并进一步假定每个像素点的透射率  $t$  是已知的,对模型方程两边在 r、g、b 三个通道中求最小值运算,即

$$\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) = t(x) \min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x) + [1 - t(x)] A. \quad (4)$$

根据暗原色先验规律,无雾图像的暗原色  $J_{\text{dark}}$  应该是接近于 0 的,即

$$J_{\text{dark}} = \min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x) = 0. \quad (5)$$

又有大气光因子  $A \neq 0$ , 所以由(4)式可得到透射率  $t$  的表达式为

$$t(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) / A, \quad (6)$$

式中  $\min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x)$  为雾图的暗原色。现实中,即使是很晴朗的天气,空气中总会不可避免地包含一些杂质分子<sup>[16]</sup>。所以,当看远处的物体时,雾依然是存在的。而且,雾的存在是人们感知深度的一个基本线索。如果彻底地移除雾的存在,图像看起来会不真实,并且深度感会丢失。因此,为有针对性的保留一部分覆盖远景物的雾<sup>[17-18]</sup>,在(6)式中引入收缩因子  $w$  ( $0 < w \leq 1$ ),则

$$t(x) = 1 - w \min_{c \in \{r, g, b\}} I^c(x) / A. \quad (7)$$

通过这一修正,对于远处的物体,能相应地保留更多的雾。 $\omega$  的取值根据雾浓度决定。 $\omega$  取值越大,去雾越彻底;相反,去雾越少。在本文中,选取  $\omega=0.85$ ,以达到更好的视觉效果。图 1 和 2 是针对带雾遥感图像,分别应用文献[2]方法和本文方法处理后得到的透射率分布图。可以看出,采用本文方法求得的透射率图不存在块状效应,景物的边缘信息保持完好。



图 1 雾化图像及其透射率分布图。(a) 原图; (b) 文献[2]方法估计透射率图; (c) 本文方法获取透射率图  
Fig. 1 Hazed image and its transmission distributions. (a) Original image; (b) estimated transmission map by Ref. [2] method; (c) obtained transmission map by proposed method

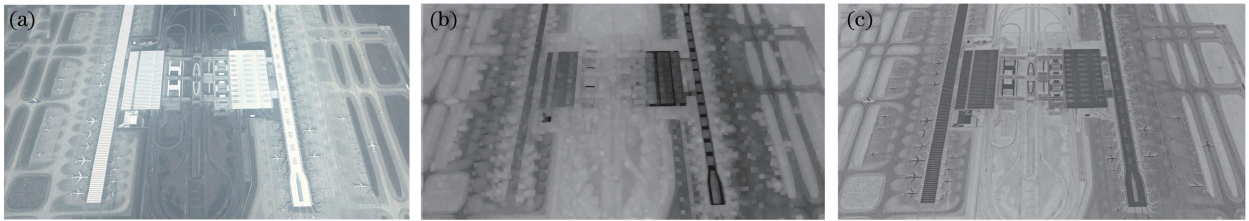


图 2 雾化图像及其透射率分布图。(a) 原图; (b) 文献[2]方法估计透射率图; (c) 本文方法获取透射率图  
Fig. 2 Hazed image and its transmission distributions. (a) Original image; (b) estimated transmission map by Ref. [2] method; (c) obtained transmission map by proposed method

#### 4.2 大气光成分的获取

以前的单幅图像去雾方法中,大气光值通常选取为整幅图像中像素点强度值的最大值。

但在实际的图像中,强度值最大的像素点未必是天空区域,也有可能是一个白色的建筑物。根据暗原色先验规律,通过雾图的暗原色能够得到还算理想的雾浓度的估计值<sup>[19]</sup>。所以,可以通过暗原色提高大气光的估测值。

选取整幅图像中在暗原色阈值内的暗原色最大值作为大气光  $A$  的估测值,即

$$A = \max_{x \in I} [I'_{\text{dark}}(x)], \quad (8)$$

式中  $I'_{\text{dark}}(x)$  表示小于阈值的暗原色,其中大于阈值的暗原色被剔除,不参与  $A$  的求取过程。

#### 4.3 无雾图像的复原

通过已求得的透射率  $t$  和大气光成分  $A$  即可实现无雾图像的复原。考虑到透射率图中存在一些像素强度值可能接近于 0,为避免去雾结果夹杂噪声,将透射率设定了一个下限值  $t_0$ ,本文取  $t_0=0.1$ 。根据雾成像物理模型,可推导得复原图像  $J$  的表达式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t, t_0)} + A, \quad (9)$$

式中  $\max(t, t_0)$  表示取二者中最大值。

### 5 实验结果与分析

从谷歌地球截取多幅受雾影响的遥感图像进行对比实验,来验证算法的有效性与高效性。实验结果如图 3~6 所示。图 3~6 中(a)为受雾影响的图像,可以看出,被雾干扰部分的景象比较模糊,细节信息不足,出现了色彩偏移。图 3~6 中(b)是采用文献[2]方法处理后的结果,处理时局域分块大小为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ 。图 3~6 中(c)是本文方法的处理结果。

从去雾效果上看,本文方法和文献[2]方法都达到了很好的去雾效果,图像的清晰度、对比度都得到了明

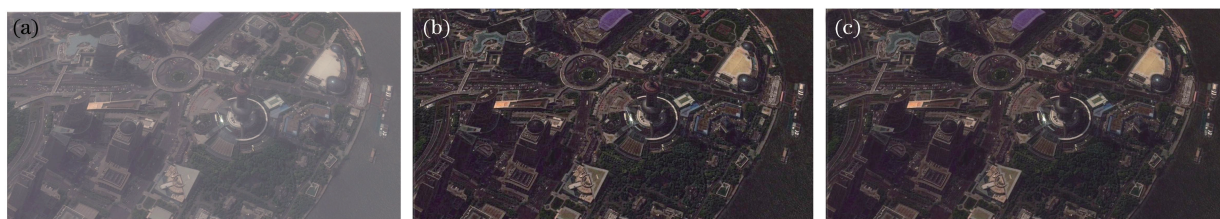


图 3 去雾结果图。(a) 雾图；(b) 文献[2]方法；(c) 本文方法

Fig. 3 Defogging effects. (a) Hazed image; (b) Ref. [2] method; (c) proposed method



图 4 去雾结果图。(a) 雾图；(b) 文献[2]方法；(c) 本文方法

Fig. 4 Defogging effects. (a) Hazed image; (b) Ref. [2] method; (c) proposed method

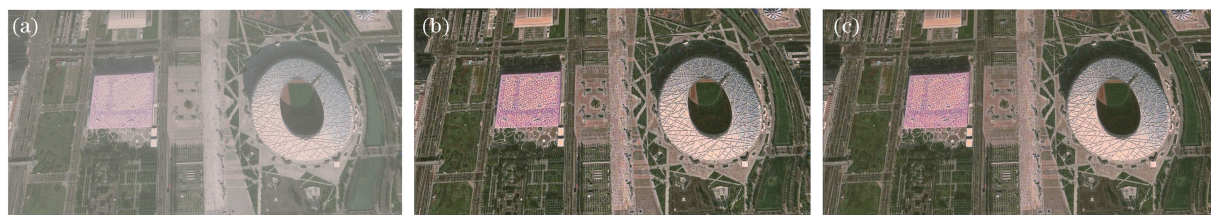


图 5 去雾结果图。(a) 雾图；(b) 文献[2]方法；(c) 本文方法

Fig. 5 Defogging effects. (a) Hazed image; (b) Ref. [2] method; (c) proposed method

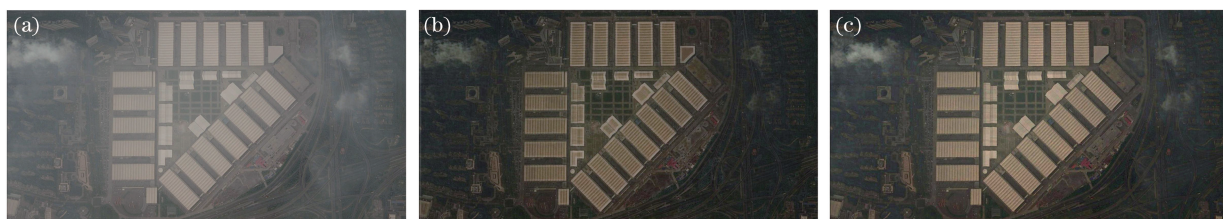


图 6 去雾结果图。(a) 雾图；(b) 文献[2]方法；(c) 本文方法

Fig. 6 Defogging effects. (a) Hazed image; (b) Ref. [2] method; (c) proposed method

显的提升,还原了景物的真实色彩。与文献[2]方法比较,本文方法处理结果整体上颜色偏暗,但视觉效果并没有明显降低。从图 6 可以看出,本文改进的方法针对雾浓度分布不均匀的图像不能保证每个区域都能很好地恢复图像。

为进一步证实本文算法的有效性及其稳定性,本文选取方差、平均梯度(GMG)、信息熵(H)质量评价指标对图 3 和 4 进行定量分析。表 1 给出了原始雾图、文献[2]去雾结果及本文方法去雾结果的各项指标数据,从表 1 中可以看出,通过文献[2]方法和本文方法复原得到的无雾图像与原始雾图相比较,其方差、平均梯度和信息熵指标数据都有明显的提升,表征了复原的无雾图像灰度层次丰富、图像信息量增多,说明了去雾后的图像对比度和清晰度更高,图像细节信息更加明显、色彩更加饱和。从图 4 的结果可以看出,本文方法的部分指标与文献[2]方法相比有所提高,这主要是因为本文方法有效地解决了遥感影像中部分区域存在的暗原色失效的问题。

为验证本文算法高效的性能,对文献[2]方法和本文方法采用 FPGA 硬件实现。在 Spartan6 系列 FPGA 上,图 3~6 的处理时间如表 2 所示。

表 1 去雾效果定量评价

Table 1 Quantitative evaluation of defogging effect

Figure	Variance	GMG	H
Fig. 3(a)	317.006	2.547	10.863
Fig. 3(b)	725.341	5.338	13.143
Fig. 3(c)	585.245	4.183	12.485
Fig. 4(a)	1246.812	4.244	11.541
Fig. 4(b)	3409.430	9.830	13.931
Fig. 4(c)	3168.131	8.363	14.109

表 2 处理时间比较

Table 2 Comparison of processing time

Figure	Figure size / (pixel $\times$ pixel)	Processing time of Ref.[2] /ms	Processing time of proposed method /ms
Fig. 3	1124 $\times$ 659	216.9	3.905
Fig. 4	1362 $\times$ 723	270.1	5.023
Fig. 5	1536 $\times$ 825	353.6	6.436
Fig. 6	1756 $\times$ 962	472.2	8.546

由表 2 可以看出,本文方法的处理时间仅为文献[2]方法的 2%左右。其主要原因是本文方法在采用 FPGA 硬件实现过程中避免了多次局部滤波运算带来的时间延迟和软抠图法带来的巨大运算量,最大限度地降低了算法的时间复杂度,充分提高了算法的处理效率,并且本文提出的改进算法的时间复杂度和空间复杂度与图像大小呈线性关系。

## 6 结 论

针对遥感图像的特点以及图像处理实时性要求,基于暗原色先验规律,提出了适用于遥感图像的实时去雾算法。详细介绍了暗原色先验规律及其去雾原理,重点阐述了改进的方法,并选取多幅带雾遥感图像进行实验验证,给出了算法处理结果及处理时间,从主观和客观角度对去雾效果进行了定量评价及分析,并对算法的时效性进行了对比分析。实验结果表明,该方法在保证去雾效果的前提下,显著地提高了算法的处理速率,平均处理时间仅为文献[2]方法的 2%。

不过,该改进方法存在一定的局限性,在浓雾或雾浓度分布不均匀的情况下,无法完全消除雾对图像的影响,下一步将在保证算法实时性的基础上,进一步完善算法,以实现更复杂多变情况下的去雾处理。

## 参 考 文 献

- [1] Ji X, Feng Y, Liu G, *et al.* Real-time defogging processing of aerial images[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2010: 1-4.
- [2] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [3] Tan R. Visibility in bad weather from a single image[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- [4] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2009: 2201-2208.
- [5] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [6] Pang Chunying, Ji Xiaoqiang, Sun Lina, *et al.* An improved method of image fast defogging [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(7): 872-877.  
庞春莹, 嵇晓强, 孙丽娜, 等. 一种改进的图像快速去雾新方法[J]. 光子学报, 2013, 42(7): 872-877.
- [7] Wang Weixing, Xiao Xiang, Chen Liangqin. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 2100-2108.  
王卫星, 肖翔, 陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2100-2108.
- [8] Wu Di, Zhu Qingsong. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-

239.

吴 迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 221-239.

- [9] Sun Yubao, Xiao Liang, Wei Zihui, *et al.* Method of defogging image of outdoors scenes based on PDE[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(16): 3739-3744.  
孙玉宝, 肖 亮, 韦志辉, 等. 基于偏微分方程的户外图像去雾方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3739-3744.
- [10] Lin Yong, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.* Simulation research on non-line-of-sight atmospheric propagation in fog weather[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0901001.  
林 勇, 徐智勇, 汪井源, 等. 雾环境下非视距大气散射传输特性研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0901001.
- [11] Hao Zengzhou, Pan Delu, Gong Fang, *et al.* Optical radiance characteristics of sea fog based on remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(12): 2420-2426.  
郝增周, 潘德炉, 龚 芳, 等. 海雾的遥感光学辐射特性[J]. 光学学报, 2008, 28(12): 2420-2426.
- [12] Wang Jingdong, Zhang Wentao, Wang Zirui, *et al.* A fast aerial image dehaze algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(3): 636-643.  
王敬东, 张文涛, 王子瑞, 等. 一种快速航空图像去雾算法[J]. 航空学报, 2013, 34(3): 636-643.
- [13] Gao Yin, Yun Lijun, Shi Junsheng, *et al.* Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the model[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0809001.  
高 隐, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0809001.
- [14] Ji Xiaoqiang, Dai Ming, Yin Chuanli, *et al.* Haze removal for aerial degraded images[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1659-1668.  
嵇晓强, 戴 明, 尹传历, 等. 航拍降质图像的去雾处理[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1659-1668.
- [15] Gan Jiajia, Xiao Chunxia. Fast image dehazing based on accurate scattering map[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(5): 583-590.  
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.
- [16] Ge Guangyi, Wei Zhenzhong. Noise inhibition method during image dehazing process [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(8): 2765-2771.  
葛广一, 魏振忠. 图像去雾过程中的噪声抑制方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2765-2771.
- [17] Nan Dong, Bi Duyan, Ma Shiping, *et al.* A quality assessment method with classified-learning for dehazed images[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2): 270-278.  
南 栋, 毕笃彦, 马时平, 等. 基于分类学习的去雾后图像质量评价算法[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 270-278.
- [18] Gan Yuquan, Wen Desheng, Wang Le, *et al.* Haze removal using dark channel for remote sensing images of natural disaster[J]. Acta Photoneca Sinica, 2015, 44(6): 0610003.  
甘玉泉, 汶德胜, 王 乐, 等. 暗通道自然灾害遥感图像去雾[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 0610003.
- [19] Wang Shizhen, Wan Huiqiong, Zeng Lingsha, *et al.* Haze removal methods of remote sensing image using dark channel prior[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2011, 28(3): 182-185.  
王时震, 万惠琼, 曾令沙, 等. 应用暗原色先验规律的遥感影像去雾技术[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(3): 182-185.