

doi:10.3788/gzxb20154406.0610003

暗通道自然灾害遥感图像去雾

甘玉泉, 汶德胜, 王乐, 高晓惠, 卫翠玉

(中科院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(中国科学院大学, 北京 100083)

摘 要:为了解决自然灾害遥感影像中局部存在浓雾的问题,提出了一种基于暗原色先验和雾天图像退化模型的图像去雾方法,并利用导向滤波实现光学遥感影像的去雾.首先,结合自然灾害遥感图像的特点,利用阈值将图像分为浓雾区域和薄雾区域,采用不同的方法得出两个区域的暗通道图;然后,结合导向滤波对透射率图进行优化,再对图像进行对比度拉伸,提高图像的动态范围,并选取多幅遥感图像进行去雾试验.最后,设计了一组图像增强质量评价指标,对去雾结果进行定量分析.结果表明,该方法能从物理特性上明显去除雾的干扰,提高图像清晰度,增强图像色彩和细节,从而复原得到高质量图像,在一定程度上能满足自然灾害遥感图像去雾的要求.

关键词:图像处理;遥感图像;去雾算法;自然灾害图像;暗通道;导向滤波;透射率;图像增强

中图分类号:TP751.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0610003-5

Haze Removal Using Dark Channel for Remote Sensing Images of Natural Disaster

GAN Yu-quan, WEN De-sheng, WANG Le, GAO Xiao-hui, WEI Cui-yu

(Key Laboratory of Spectral Imaging, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to remove the haze in natural disaster remote sensing images, an approach based on dark channel and hazy image degradation model was presented, which could remove the haze by using guided filter. Firstly, images of natural disaster were divided into fog area and mist area by threshold, and different methods were used to obtain the dark channel of the images. Then, guided filter was used to optimize the transmission map, and the contrast of the images was stretched to improve the dynamic range of the images. A series of natural disaster remote sensing images were chosen to test the algorithm of haze removal. Finally, a series of evaluate parameters were proposed to assess the method. The result shows that the proposed algorithm can remove the haze of the images, improve the image quality, and enhance the color and detail of the images, so that the high-quality images can be obtained, which meet the requirements of haze removal for natural disaster remote sensing images to some extent.

Key words: Image processing; Remote sensing image; Haze removal algorithm; Natural disaster image; Dark channel; Guided filter; Transmission map; Image enhancement

OCIS Codes: 010.0280; 070.4560; 070.6110; 100.2980

0 引言

可见光遥感影像被广泛应用于土地测绘、灾情侦

察、气象观测等各行各业,并且以其丰富的信息、高空间分辨率以及几何定位等优势,成为获取空间信息的有效手段^[1].但是,可见光遥感影像易受云雾的遮挡从

基金项目:国家自然科学基金(No. 11327303)、中科院空间科学先导专项(No. XDA04075600)和中国科学院创新交叉团队(空间高能宇宙辐射的探测与研究团队)项目资助

第一作者:甘玉泉(1986-),女,博士研究生,主要研究方向为光谱成像技术、光谱数据处理及图像处理. Email:ganyuquan@opt.ac.cn

导师:汶德胜(1965-),男,研究员,博导,主要研究方向为光电成像技术及快速信号处理技术. Email:ven@opt.ac.cn

收稿日期:2014-12-15; **录用日期:**2015-03-04

<http://www.photon.ac.cn>

而影响数据的有效使用. 通常, 在可见光光学遥感仪器成像时, 光从物体表面反射到成像设备的过程中发生散射和吸收等, 造成图像对比度低、色彩灰暗、模糊不清及目标识别错误等情况, 尤其在自然灾害之后, 有雾天气更是常见, 使得光学遥感成像数据可用率降低, 这直接限制了自然灾害情况下的遥感影像的摄影测量工作时间^[2-3]. 因此, 去除云雾不仅可以增强遥感数据的有效性和可用性, 而且可以大大降低气象条件对自然灾害光学遥感成像测量的限制.

图像去雾由于应用广泛近年来成为研究热点. Tan^[4]通过最大化局部对比度来去雾, 但对饱和度较高的原图像易造成失真的效果; He^[5]提出了暗通道的去雾法, 但是其采用的 Softmatting 方法优化透射率的处理时间较长, 随后提出了导向滤波的方法缩短处理时间. Fattal^[6]提出了独立分量分析法实现了单幅图像去雾, 但该方法的性能很大程度上取决于输入图像的统计特性且依赖于其颜色信息, 因此在浓雾区域及灰度图像的情况下无法处理. 一些研究者基于 He 的暗通道先验规律, 对图像去雾算法进行了一系列的改进处理. 文献[7]通过设置阈值来快速计算透射率图; 文献[8]通过加权暗通道的方法, 估计了图像边缘位置的深度信息, 对图像的深度不连续处的处理取得了较好的结果; 文献[9-10]使用快速的双边滤波器来估计大气光值, 获得了较快的处理速度, 减小了计算复杂度; 文献[11]通过边缘检测来寻找暗原色值进行滤波从而使透射率图更准确, 并利用尺度因子及阈值使图像颜色更保真; 文献[12]将图像从 RGB 彩色空间转换到 HIS 彩色空间, 并对图像进行分割, 对每一个局部小方块进行大气光的估计, 从而恢复出较为清晰的图像.

本文提出了一种适用于具有浓雾和薄雾区域的遥感图像去雾方法. 首先利用阈值将图像分为浓雾区域和薄雾区域, 并且用不同的方法来得出其暗通道图, 进而求出透射率图; 再利用导向滤波实现了透射率图的优化; 最后, 对图像进行对比度拉伸, 提高图像的动态范围, 从而实现自然灾害情况下的可见光遥感影像去雾.

1 去雾流程

1.1 雾天图像退化模型

常用的雾天图像模型为

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

式中, $I(x)$ 为观测图像的辐射强度; $J(x)$ 为来自目标场景的辐射信息; $t(x)$ 为场景辐射在大气传输过程中的透射率.

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

式中, β 为大气散射系数, $d(x)$ 为景深. 式(2)表明场景辐射的透射率与场景深度呈指数关系. $J(x)t(x)$ 为目

标辐射信息的直接衰减, 描述了目标的电磁波信息经过传输介质后到达传感器的能量; A 为大气光成分, $(1-t(x))A$ 代表大气光经过衰减后到达传感器的能量. 图像去雾的目的就是从 I 中恢复出 J .

1.2 暗原色先验

暗原色先验是指, 在图像的任意窗口区域中, 往往存在某一通道的灰度值非常低甚至为零的像素. 暗原色图像可描述为

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

式中, J^c 是图像 J 的 3 个通道中的某一个通道; J^{dark} 即图像 J 的强度接近于 0 的暗原色; $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的一块区域. 假设图像块 $\Omega(x)$ 具有相同的深度, 那么, 对于带雾的图像 I , 这些暗原色的灰度值会变高, 并决定透射率的大小.

1.3 大气光 A 及透过率的估算

暗通道图像反映了图像 I 中雾的分布, 因此可以用来估算由雾散射的光, A 的值近似等于雾最浓区域的值, 即带雾图像 I 中的灰度值最大的像素可作为大气光 A 的近似值. 在实际中, 可以借助于暗通道图从有雾图像中获取该值.

从暗通道图中取亮度大小为前 0.1% 的像素, 在原有雾图像 I 中寻找这些像素位置对应的具有最高亮度点的值, 作为 A 的值.

对式(1)变形为

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = \frac{J^c(x)}{A^c} t(x) + 1 - t(x) \quad (4)$$

式中的 c 表示 r, g, b 三个通道, 然后假设图像块 $\Omega(x)$ 中透射率 $t(x)$ 为常量, 定义为 $\tilde{t}(x)$, 并且 A 值已经给定, 式(4)对式(3)左右同除 A 归一化并进行暗通道运算, 即求两次最小值, 得

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{J^c(y)}{A^c} \right) + 1 - \tilde{t}(x) \quad (5)$$

由暗通道先验可知, 其暗通道图像接近于零, 即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c J^c(y)) = 0. \text{ 因此可得}$$

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (6)$$

式(6)即为透射率 $t(x)$ 的预估值.

引入参量 ω ($0 < \omega < 1$) 来控制去雾程度

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_c \frac{I^c(y)}{A^c} \right) \quad (7)$$

利用粗略透射率图像 $\tilde{t}(x)$ 引导滤波进行优化可得透射率 $t(x)$. 当透射率 t 的值很小时, 会导致 J 的值偏大, 使得图像偏白, 因此可设置阈值 t_0 来保留一定量的雾, 使得最终恢复公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (8)$$

由式(4)~(8)可知 I, A 和 t , 结合式 (1) 可得 $J = (I - A) / t + A$, 即可求得复原后的图像 J .

2 本文算法

2.1 暗通道、大气光值及透射率的求取

自然灾害后的遥感影像中, 会存在局部灾害地区云雾浓重的现象, 而部分无灾害地区只有薄雾, 即云雾分布不均匀. 在雾较浓的区域, 其暗通道的灰度值也会

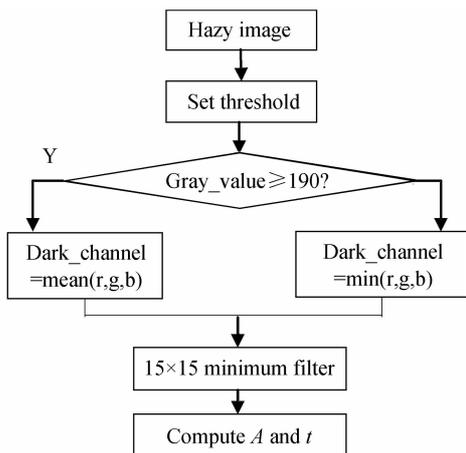


图1 暗通道及透射率图计算流程

Fig. 1 Compute flow of A and t

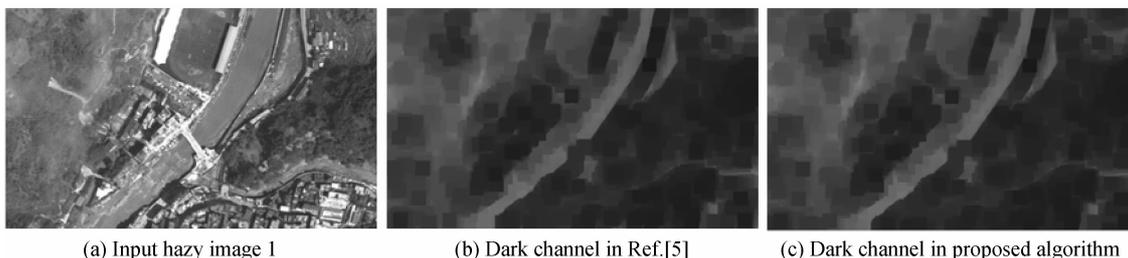


图2 暗通道图对比

Fig. 2 Comparison of the dark channel

2.2 导向滤波

文献[5]使用 Softmatting 方法来进行透射率的优化, 而此过程需要构造 Matting Laplacian 稀疏矩阵, 占用大量存储空间, 而且, 该矩阵每个值均需要通过计算得到, 因此对空间复杂度和时间复杂度的要求都较高. 本文通过导向滤波的方式来得到优化后的透射率图.

导向滤波器输出结果是导向图像的局部线性转换. 导向滤波器有一个好的边缘保持平滑效果, 但没有梯度逆转伪影的影响. 导向滤波器定义为

$$q(x) = a(x)p(x) + b(x) \quad (9)$$

式中, $x \in \Omega(x)$, p 是输入, q 是输出, 也指一个点 x 的滤波之后的值 $q(x)$, 是该点的输入 $p(x)$ 和以该点为中心的 Ω 区域内像素平均值的加权值, Ω 区域内的滤波可以是各种滤波形式, 可求得

$$\begin{cases} a(x) = \sigma^2 / (\sigma^2 + \epsilon) \\ b(x) = \epsilon / (\sigma^2 + \epsilon) \end{cases} \quad (10)$$

增加. 这种情况下, 对于整个图像, 如果直接求全局的暗原色, 会导致薄雾区域图像色彩失真, 所以采用将图像分为浓雾区域和薄雾区域的方法来求取暗原色值. 具体实施步骤如图 1.

1) 将图像分割为浓雾区域和薄雾区域, 设置灰度值阈值为 190, 若大于阈值, 则认为是浓雾区域, 若小于阈值则认为是薄雾区域; 2) 对浓雾区域, 每个像素的三通道平均值作为暗通道值, 对于薄雾区域, 选择三通道中灰度值最低的值作为暗通道值; 3) 对整幅图像进行分块 (如 15×15) 最小值滤波; 4) 计算大气光值 A , 本文算法直接选取原图像 r, g, b 三个通道中的最大灰度值作为大气光值; 5) 计算透射率 t 的分布图, 利用获得的暗原色值计算大气光 A , 并且利用式 (6) 计算透射率.

这样做是由于, 浓雾区域的最小灰度值相对薄雾区域较高, 如果直接最小值计算会使得暗通道值较低, 导致透射率计算不准确, 选择三通道的平均值使得浓雾区域的暗通道计算更能真实反应图像原本的带雾状态, 那么暗通道的值计算更精细, 得到的图像透射率也更准确. 同时, 也可以保留原有图像的带雾痕迹, 不至于使图像失真. 图 2 为该算法的暗通道对比图.

式中, σ 是 Ω 区域内的像素方差值, ϵ 是一个防止计算时除以 0 值的很小的值.

Ω 设置为 5×5 的正方形区域, 将式 (7) 获得的透射率图像定义为输入 $p(x)$, 利用式 (9) 即可得到经导向滤波优化后的透射率图 $q(x)$.

2.3 对比度调节

由于自然灾害情况下遥感带雾图像的亮度不及大气光线, 经过去雾处理后通常会出现颜色失真, 图像亮度变暗. 同时, 局部浓雾区域去雾效果不明显, 图像不够清晰, 所以通过调整图像对比度来增强图像. 本文采用图像直接对比度拉伸的方法, 其原理是对去雾后图像的三个通道分别进行处理. 首先, 减去一个值 v , 是因为部分浓雾区域的雾去除得不够, 减去这个值后浓雾区域的亮度变低, 浓雾区域的雾也更多, 将 v 值设置为 $v = |1/3(\sum_{c \in \{r, g, b\}} \min Q^c(x))|$. 然后, 再对每个通道除以一个系数 k , 对灰度值进行拉伸, $k = \omega \min(\max_{c \in \{r, g, b\}}$

$Q^c(X) = \min_{c \in \{r, g, b\}} Q^c(x)$, 其中 w 为一个系数, 取值为 0.75. k 的选择是根据每个通道本身的灰度值来确定, 适应于每个通道的图像亮度, 这样增强了浓雾部分的图像. 经过对多幅图像实验, 可知图像细节更清晰, 并且图像颜色更接近真实颜色, 去雾效果也更好.

3 实验结果与分析

3.1 图像去雾效果对比

采用多幅自然灾害遥感图像进行去雾实验对比,

带雾图像 1 与带雾图像 2 均为四川省雅安市芦山县发生 7.0 级地震后所获得的航空遥感图像. 图 3 是几幅图像的实验结果对比, 图 4 是图 3 的局部放大图. 从图中可以看出, 本文去雾方法在浓雾区域的去雾效果较好, 并且能保持薄雾区域图像原本的色彩. 从图 3 及图 4 的处理结果可以看出, 带雾图像 1 中操场及屋顶色彩都得到了增强, 带雾图像 2 中绿色农田的色彩及河流、桥梁细节也得到了增强. 同时, 图中浓雾区域的去雾效果相比文献[5]要更好, 并且薄雾区域的色彩也得

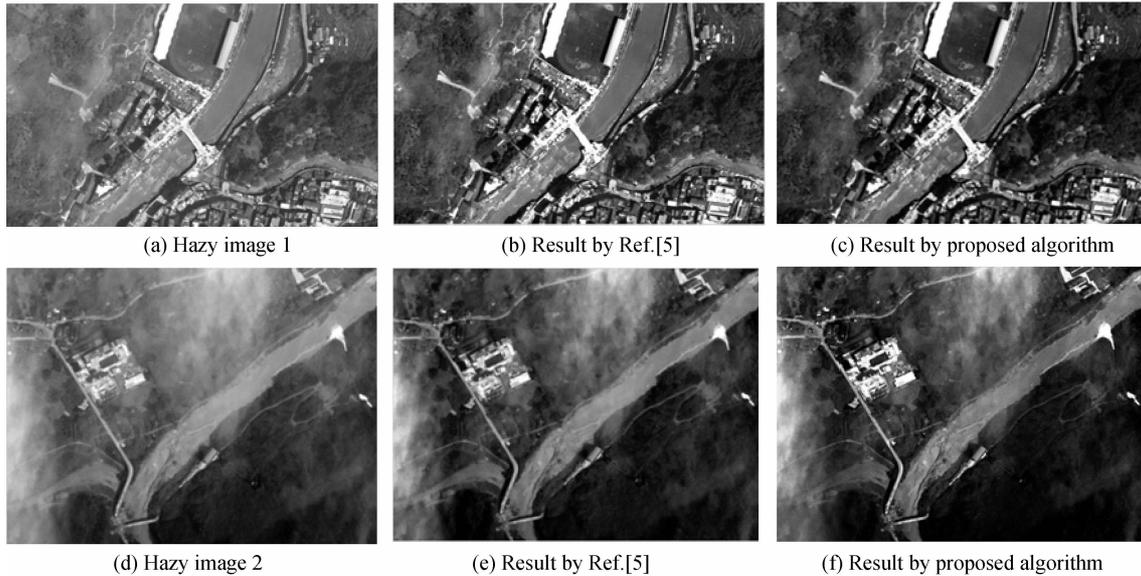


图 3 实验结果图比较

Fig. 3 Comparison of the images

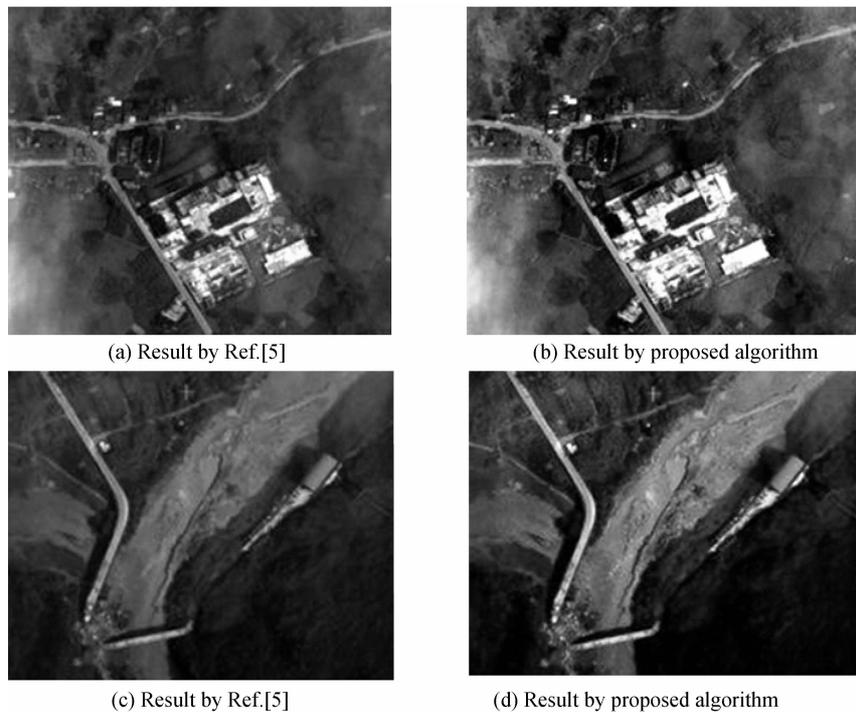


图 4 局部放大对比图

Fig. 4 Comparison the partial enlarged detail of hazy image2

到了增强,并且保持了物体的原本色彩。

3.2 定量分析

通过大量实验分析,对本文算法与文献[5]的去雾算法进行定量评价。

表1给出了评价指标的具体数值,其中,信息熵定义为 $H = -0 \sum_{i=0}^{2^b-1} p_i \log p_i$,式中 p_i 为像素值 i 出现的概率, b 为每个采样点的位数。信息熵反映了图像携带信息量的大小,信息熵越大,则图像携带信息越多。

表1 原始图像与去雾图像的参量比较

Table 1 The parameters comparison of the images

Image	Mean value	MSE	Mean grad	Entropy
Hazy image 1	109.7334	6.3844	13.5980	7.1845
Ref. [5] method	83.4111	7.0314	17.3834	7.4200
Proposed method	72.1864	7.3813	18.6027	7.4268
Hazy image 2	96.5878	6.9461	6.5377	7.3500
Ref. [5] method	69.6799	6.9982	8.9175	7.4287
Proposed method	62.6025	7.1698	8.7964	7.3566

从表1可以看出,经过处理,本文去雾方法在均方差、平均梯度及信息熵这几个指标上,相比于原有带雾图像均有所提高,同时,处理后的图像细节较清晰,图像色彩丰富,说明在增强图像的过程中,并没有丢失原有图像信息。其中,带雾图像2的信息熵相比于文献[5]的方法有所降低,但是从处理后图像可以看出,本文方法对图像色彩进行了加强,更有助于人眼判别细节。表明该方法对于同时具有浓雾和薄雾的自然灾害遥感图像均具有较好的效果。

4 结论

本文首先利用阈值划分图像的浓雾区域及薄雾区域,然后对不同区域用不同的方法计算暗通道图;再计算大气光通量,用导向滤波取代耗费时间及内存的Softmatting过程,直接生成优化的透射率图,针对自然灾害遥感图像出现的雾浓度不均匀的情况进行了改进。实验结果表明,本文算法能较好地去除各种雾对光学遥感图像的影响,同时能提高图像的对比度,保持图像原本色彩,更适合于人眼观察,便于对光学遥感图像的分析,可应用到自然灾害遥感图像去雾上。

参考文献

- [1] 陈鹰. 遥感影像的数字摄影测量[M]. 同济大学出版社, 2003.
- [2] TAO He-ping, LIU Bing-tao, LIU Shu-zhen, et al. Natural hazards monitoring using remote sensing—a case study of 5·12 wenchuan earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, **26**(3): 276-279.
陶和平, 刘斌涛, 刘淑珍, 等. 遥感在重大自然灾害监测中的应用前景——以5.12汶川地震为例[J]. *山地学报*, 2008, **26**(3): 276-279.
- [3] HE Hui, PENG Wang-lu, KUANG Jin-yu. Thin cloud cover removed from high-resolution remote sensing images based on the adaptive filtering and gray-scale transformation [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2009, **11**(3): 305-311.
贺辉, 彭望录, 匡锦瑜. 自适应滤波的高分辨率遥感影像薄云去除算法[J]. *地球信息科学学报*, 2009, **11**(3): 305-311.
- [4] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Alaska, USA, 2008:1-8.
- [5] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(12): 2341-2353.
- [6] FATTAL R. Single image dehazing[C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), ACM, 2008, **27**(3): 72.
- [7] YANG Jing-yu, ZHANG Yong-sheng, ZOU Xiao-liang, et al. Using dark channel prior to quickly remove haze from a single image[J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2010, **35**(11): 1292-1295.
杨靖宇, 张永生, 邹晓亮, 等. 利用暗原色先验知识实现航空影响快速去雾[J]. *武汉大学学报*, 2010, **35**(11): 1292-1295.
- [8] LIU Lan, CHENG Yong-mei, ZHAO Yong-qiang, et al. An image dehazing method based on weighted dark channel prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(3): 320-325.
刘楠, 程咏梅, 赵永强, 等. 基于加权暗通道的图像去雾方法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(3): 320-325.
- [9] SUN Kang, WANG Bo, ZHOU Zhi-qiang, et al. Real time image haze removal using bilateral filter[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2011, **31**(7): 810-813.
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.
- [10] PANG Chun-ying, JI Xiao-qiang, SUN Li-na, et al. An improved method of image fast defogging[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(7): 872-877.
庞春颖, 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.
- [11] CHEN Lu, HE Hong-jie, CHEN Fan. A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1110003.
陈露, 和红杰, 陈帆. 基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11): 1110003.
- [12] HUANG Li-hong. A novel algorithm for single image dehazing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1419-1422.
黄黎红. 单幅图像的去雾新算法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1419-1422.
- [13] WANG Shi-zhen, WAN Hui-qiong. Haze removal methods of remote sensing images using dark channel prior[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, **28**(3): 183-189.
王时震, 万惠琼. 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): 183-189.
- [14] ZHU Ya-bing, LIU Jun-min. An single image dehazing algorithm using sky detection and segmentation[C]. Image and Signal Processing (CISP), 2014 7th International Congress on. IEEE, 2014: 248-252.
- [15] WANG Zhong-liang, FENG Yan. Fast single haze image enhancement [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, **40**(3): 785-795.
- [16] GUO De-quan, LIU Paul, SHE Yue, et al. Ultrasonic imaging contrast enhancement using modified dehaze image model[J]. *Electronics Letters*, 2013, **49**(19): 1209-1211.