

高分辨率遥感卫星图像不均匀云雾去除算法

龚文斌^{1*}, 石章松¹, 韦华²

¹海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430000;

²中国人民解放军海军参谋部, 北京 100841

摘要 针对高分辨率遥感卫星图像采用单一算法难以有效去除不均匀云雾的问题, 提出一种基于图像分割和暗原色先验改进方法相结合的优化算法。采用图像分割技术将原云雾图像分割成浓雾部分和淡雾部分。浓雾部分采用加权多尺度 Retinex 算法进行局部增强去雾处理; 淡雾部分采用改进暗原色方法, 将暗原色图像去雾模型由 RGB 颜色空间转换到 HSI 颜色空间, 提取亮度分量, 获取准确的大气光值, 并采用容差机制优化获取大气透射率, 在此基础上采用自动色阶法增强处理, 获取去除云雾后的图像。实验对比表明提出的算法能够很好地还原图像细节, 有效恢复图像的颜色和清晰度。

关键词 机器视觉; 去雾处理; 高分辨率遥感图像; 暗原色先验法; 图像分割

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.061504

Nonuniform Cloud Removal Algorithm for High Resolution Remote Sensing Satellite Images

Gong Wenbin¹, Shi Zhangsong¹, Wei Hua²

¹Colloge of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430000, China;

²Naval Staff of PLA, Beijing 100841, China

Abstract Aiming at the problem that nonuniform cloud is difficult to remove effectively by using single algorithms for high resolution remote sensing satellite images, an optimization algorithm based on image segmentation and improved dark channel prior method is proposed. The original cloud image is segmented into a dense fog area and a thinner fog area by the image segmentation technique. The dense fog area adopts weighted multiscale Retinex algorithm to realize local enhancement and remove the fog. The thinner fog area adopts the improved dark color method, transforming the dark color image defogging model from RGB color space to HSI color space, extracting the luminance component, and obtaining accurate atmospheric optical values. The atmospheric transmittance is optimized by the tolerance mechanism, and the defogged image is obtained by enhancement of the automatic gradation method. Experimental results show that the proposed algorithm can restore image details and recover image color and clarity effectively.

Key words machine vision; defogging; high resolution remote sensing image; dark-channel prior method; image segmentation

OCIS codes 150.1135; 100.2980; 280.1310

1 引言

随着天基信息系统的不断发展, 遥感卫星被广泛应用于战场情报侦察, 而高分辨率遥感卫星具有丰富的光谱信息、高时空分辨率等特点, 在战场环境

侦察及目标的识别定位中发挥重要作用。但光学遥感卫星因可见光成像常会受到不良云雾天气的影响, 出现目标影像对比度降低、辨识度下降、细节信息不明显等影像退化现象, 严重影响目标的判别^[1]。因此, 有效去除云雾造成的影响对提高战场环境侦

收稿日期: 2019-07-22; 修回日期: 2019-08-15; 录用日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(41771487, 41571441)

* E-mail: 270281978@qq.com

察及目标识别具有重要意义。

可见光遥感卫星图像中由于云雾浓厚程度不同,采用的消除方法也不同。对于可见光波无法穿透的较厚云雾覆盖区,地面景物信息被云层掩盖无法成像,处理方法一般是利用该地区前、后时相的无云雾覆盖的遥感图像进行插补,由于无法判别覆盖区域的地物信息,这明显不适用于实时战场侦察。对于薄云雾覆盖区,由于部分可见光波可穿透云雾,所以地物保留了一部分光谱特征。因此,可利用相关去雾技术有效去除云雾影响,恢复地面景物信息。目前,国内外应用于遥感影像去除薄云雾的方法有图像增强方法和图像复原方法^[2]。图像增强是基于非物理模型的方法,通过提升图像对比度的方式表现图像中的特征信息,但该方法并不能从根本上达到去除云雾的目的。文献[3]采用了多尺度去雾算法,引入原图像色度的非线性函数关系进行去雾处理,虽然可以得到较好的去雾效果,但违背了颜色恒常性的原理。文献[4]提出了一种运用自适应 Retinex 的算法,通过遗传算法能够自动生成算法的相关参数,该算法虽然能够较好地达到去雾效果,但处理后的图像会出现光晕现象,而且需要耗费大量的运算资源。图像复原是基于物理模型的方法,通过改变景物散射作用的大气光、叠加透射率的比例实现去雾。文献[5]采用了中值滤波算法,该算法有效提升运行速度,适合处理信息量大的图像,但会造成图像边缘信息丢失,导致图像严重失真。文献[6]采用了扩大复原图像的局部对比度的方法,去雾后的图像具有良好的视觉效果,但图像色彩饱和度过高。文献[7]基于大量户外实验提出的暗通道先验的去雾算法,是目前运用最广泛的去雾算法,结合软抠图优化透射率后,去雾效果十分显著,但该算法处理信息量大、分辨率高的遥感影像时,处理时间长,对计算机硬件要求高,时空性不好,且对大面积白色或天空区域易造成图像失真。

目前这些算法针对特定的处理对象,运用相应的算法可实现较好的效果。高分辨率遥感图像应用在战场环境侦察,由于拍摄面积覆盖广,部分地区常出现不均匀云雾,He 算法虽能较好地去除均匀云雾图像,但对不均匀薄云雾图像处理效果并不理想,出现过曝或色彩失真严重等现象。针对上述问题,本文在 He 算法的基础上,提出一种基于改进暗通道先验的高分辨率遥感卫星图像不均匀薄云雾去除方法。首先利用图像分割技术分割不同浓度的云

雾,对于浓雾采用加权多尺度 Retinex 算法进行处理,薄雾运用改进的暗原色先验算法,利用 HSI 模型获取精确的大气光值,同时采用容差机制优化透射率的估算值,对融合的图像采用自动色阶法实现去云雾图像增强处理。通过实验对比,本文算法能够较好地保护图像细节,图像整体色彩自然,清晰度高,满足应用要求。

2 暗原色先验理论及去雾原理

2.1 大气散射模型

图像质量降低的主要因素是大气中水汽微粒的米氏散射。根据米氏散射物理规律,选用目前在计算机视觉领域运用最多的 McCartney 大气散射模型,建立相应的去雾辐射模型^[8]:

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

式中: $I(x)$ 为有云雾图像; $J(x)$ 为恢复后的无云雾图像; x 为图像 $I(x)$ 的像素点坐标; A 为全球大气光成分; $t(x)$ 为透射率。图像去雾的目标是从 $I(x)$ 中复原 $J(x)$ 、 A 和 $t(x)$,但(1)式中只有 $I(x)$ 已知,若想求解方程复原图像,必须依赖于先验知识或假设,得到 A 和 $t(x)$ 。

2.2 暗原色先验理论

He 等^[7]对大量户外拍摄的无云雾图像进行分析,得出暗原色规律,即在绝大多数图像的非天空局部区域中,都存在某些像素在至少一个颜色通道的强度值接近于0。利用这一先验理论可以直接从单幅图像中估算出 A 和 $t(x)$,从而去除云雾影响,获得无雾图像。对于去雾后的图像 $J(x)$,其暗原色表达式为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{R, G, B\}} J^c(y)], \quad (2)$$

式中: $J^{\text{dark}}(x)$ 为图像的暗原色图; $J^c(y)$ 为图像 $J(x)$ 的R、G、B颜色通道中的某一颜色通道; $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部区域。暗原色先验理论指出清晰无云雾的非天空区域中,暗原色的强度值总是很小并趋于0,即 $J^{\text{dark}}(x) \rightarrow 0$ 。

3 基于图像分割和改进暗原色的图像去云雾算法

暗原色法去除云雾的基本思想是使用暗原色强度值模拟云雾的浓度,估计光的透射率,利用图像退化模型恢复原始的无云雾图像^[9]。卫星遥感图像是从太空向下拍摄的,不存在天空区域,采用 He 算法进行遥感图像去雾时不用考虑其理论限制的部分,可以实现遥感图像去雾,但图像中常出现灰白场景、

白色物体等大面积较亮区域,这些区域内找不到像素值接近 0 的暗原色点,利用不应作为大气光参考值的结果对大气光进行估算,导致估算误差较大,严重影响除雾效果。采用 He 单一算法处理不均匀云雾遥感图像时,常出现局部过度饱和、曝光过度的问题^[10]。He 算法分别对 RGB 三个通道应用大气散

射模型进行去雾处理,易造成部分图像色彩失真或过度饱和。针对这些问题,提出基于图像分割与改进暗原色的算法。利用 HSI 颜色模型精确估计透射率,采用容差机制优化透射率,最后进行自动色阶增强处理图像,解决色彩失真和过度曝光的问题。算法流程如图 1 所示。

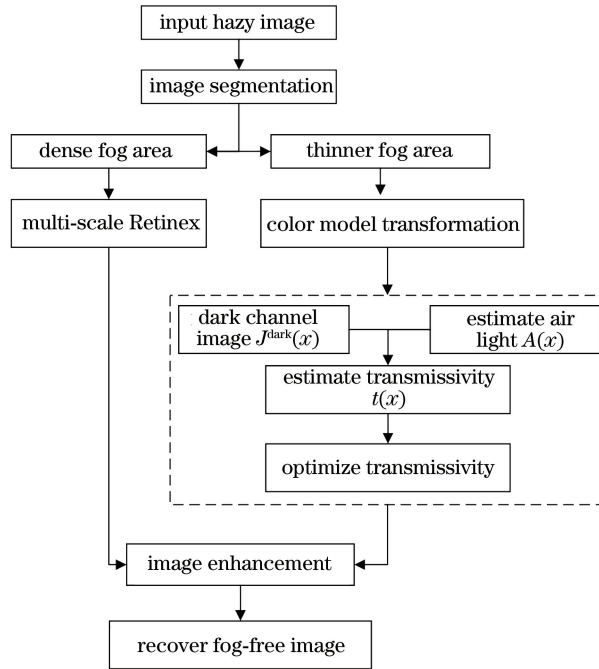


图 1 图像去雾算法流程图

Fig. 1 Flow chart of image defogging algorithm

3.1 基于阈值的图像分割

图像分割是将一个完整的图像分割成若干个非空区域的过程。分割后,每个图像的子区域不重叠并相互连接,所有像素高度相似,不同子区域间的图像像素相差较大^[11]。

在含有云雾的遥感卫星图像中,云雾的颜色为灰白色,在可见光波段对光线的反射率比大部分地面景物高,在图像上具有较高的灰度值。高分辨率遥感卫星图像中,对于不均匀的云雾图像,薄云形状不规则且呈封闭状,同一区域的云雾具有相似的形状特征,

边缘明显,成像后同一区域内部的灰度比较均匀,与其他相邻的区域灰度反差较大^[12]。因此利用该特征,采用基于光谱特征的阈值分割算法将遥感图像分割成浓雾和浓雾区域^[13]。先对云雾图像进行直方图均衡化处理,获得合适的云雾检测光谱阈值,根据获取的阈值进行分割,经过分割后的图像仍存在一定的噪声,为了得到较理想的图像,需要进行区域增长及膨胀处理,改进图像质量。图 2 采用阈值 85 进行分割,根据雾的浓度将图像粗分割为浓雾区域[图 2(b)中白色区域]和淡雾区域[图 2(c)中黑色区域]。

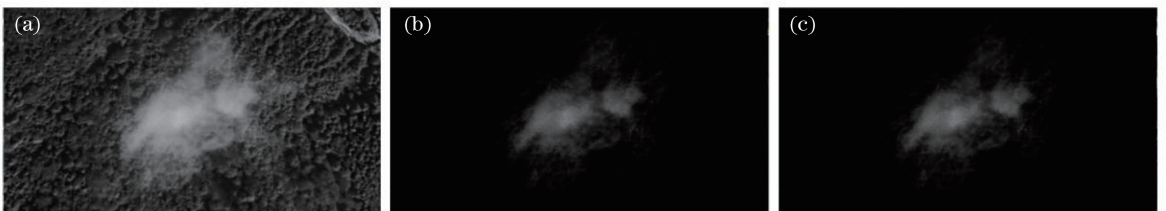


图 2 图像分割。(a)原图;(b)浓雾区域;(c)淡雾区域

Fig. 2 Image segmentation. (a) Original image; (b) dense fog area; (c) thinner fog area

3.2 基于亮度均值的大气光值估计

为了更加准确地估计大气光值,采用便于计算机视觉处理的 HSI 颜色空间模型,利用转化模型实现 RGB 颜色空间与 HSI 颜色空间的相互转换,求取亮度均值作为大气光值估计值。HSI 模型采用色调 H (Hue)、饱和度 S (Saturation) 和亮度 I (Intensity) 三种特征量表示颜色,反映了人类视觉

$$\begin{cases} I = (R + G + B)/3 \\ S = \begin{cases} 0, & I = 0 \\ 1 - \frac{3}{R + G + B} [\min\{R, G, B\}], & I \neq 0 \end{cases} \\ H = \begin{cases} \theta, & G \geq B \\ 2\pi - \theta, & G < B \end{cases}, \quad \theta = \arccos \left[\frac{(R - G) + (R - B)}{2\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

根据(3)式,将遥感图像由 RGB 颜色模型转化为 HSI 模型,分离出亮度分量 I 。大气光值 A 的估计值,采用计算暗原色图像的亮度值前 0.1% 对应原图像的像素值的平均亮度值^[15],即

$$A = \sum_{y \in A(x)} I(x)/n. \quad (4)$$

该方法估计的大气光值可以更好地处理一些有偏差的白色物体的图像,避免大气光值估计中所选像素位于这些明亮区域。

3.3 透射率的获取与优化

利用大气散射模型和暗原色原理估计大气透射率,需要基于大气光值 A 为已知,并且在局部区域里透射率是固定的,选取 RGB 三通道最小值运算,得到透射率 $t(x)$ 为

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

式中: $I^c(y)$ 表示图像 $I(x)$ 的 R、G、B 颜色通道中某一颜色通道; $\Omega(x)$ 为以 x 为中心的局部区域。为了保持图像的真实度,引入调节因子 ω ($0 < \omega \leq 1$),原 He 算法中取值为 0.95,最终估计透射率 $\tilde{t}(x)$ 可表示为

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

透射率反映大气中光传输的主要特征,因此准确估计透射率对恢复图像的质量起着关键作用^[16]。但实际计算的大气透射率为

$$t_{\text{actual}}(x) = \frac{1 - \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} [I^c(y)/A^c] \right\}}{1 - \min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} [J^c(y)/A^c] \right\}}. \quad (7)$$

He 算法在满足暗原色先验的图像区域时,

系统感知彩色的方式。人类对亮度的视觉敏感程度远强于对颜色的敏感度,将亮度与色调、饱和度分开,可以避免颜色被光照明暗等条件干扰,简化了图像分析和处理工作。 I 指物体反射的光波数量的多少,决定颜色的深浅,图像的色彩信息与 I 无关,对 I 分量处理后不会影响图像的色彩信息^[14]。其步骤如下:

$\min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} [J^c(y)/A^c] \right\}$ 被简化为 0,得到相应的透射率计算公式[(5)式],但图像白色地物区域暗原色先验知识会失效, $\min_c \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} [J^c(y)/A^c] \right\}$ 不能简单地简化为 0,否则会低估大气透射率,造成色彩失真。

(4)式估算的透射率是在假定某一区域 $\Omega(x)$ 透射率恒定的基础上进行的,得到的透射率不精确。He 等^[17] 发现这一问题,通过最小滤波得到粗略估计的透射率图后,改进导向滤波方法,进一步细化透射率图,得到边缘保持较好的透射率图,恢复的图像细节更明显。但该算法太复杂,耗费大量的时间,实时性较差。针对高分辨率遥感卫星图像数据量大、景深小且不含天空区域的特点,为了消除暗原色先验失效引起的色彩失真,在保证图像处理速度的基础上,采用 HSI 颜色空间对 I 进行去雾处理,保持颜色分类 H 和 S 不变。由于图像的结构信息主要在 I 分量上,颜色信息在 H 和 S 上,分开处理不仅可以增加图像的清晰度,保证图像细节,还可以保持颜色分量不发生变化,避免图像色彩失真。将原算法对 RGB 三通道处理简化为直接对 I 进行处理,提升了处理速度,最终得到 $t(x)$,即

$$t(x) = 1 - \omega \min_I \left[\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^I(y)}{I^A} \right], \quad (8)$$

式中: $I^I(y)$ 为图像 $I(x)$ 在 I 上的取值; I^A 为在 I 上求得的大气光值 A 。

为进一步优化透射率取值,还要调整失效区域的大气透射率函数,使 $\tilde{t}(x)$ 更接近实际值。文献[18]引入一种容差机制调整复原图像处理过程中的大气透射率。为精确估计透射率,避免低估或高估,引入容差参数 k ,对比 $|I - A|$ 与 k 的大小判断像素

是否落于失效区域。 $|I-A|>k$ 时,认为该区域满足暗原色先验,保持原始透射率不变; $|I-A|<k$ 时,认为是失效区域,重新计算透射率,适当增加 $|I-A|$ 值^[19]。

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min\left\{\max\left[\frac{k}{|I(x) - A|}, 1\right] \cdot \max[t(x), t_0], 1\right\}} + A. \quad (9)$$

针对暗原色先验去雾算法对浓雾区域失效的问题,采用加权多尺度 Retinex 算法对浓雾进行处理,得到较好的效果。多尺度 Retinex 算法以边缘像素点为中心确定优先增强。设置不同尺度 σ_n , n 为设置的不同尺度个数, $n=1, 2, 3, \dots, N$ 。

计算不同尺度的中心环绕函数 $F_n(x, y)$:

$$F_n(x, y) = K \cdot \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2], \quad (10)$$

式中: σ 为标准差,表示高斯环绕函数尺度常数; K 为归一化因子。使得

$$\iint F(x, y) dx dy = 1. \quad (11)$$

求得图像 C 颜色通道第 n 个尺度的 Retinex 算法增强输出为

$$R_{n_c}(x, y) = \ln[f_c(x, y)] - \ln[F_n(x, y) \times f_c(x, y)]. \quad (12)$$

运用加权方法对多个不同尺度的 Retinex 算法增强输出的结果进行加权平均,得到增强后的输出图像,

$$R_{M_c}(x, y) = \gamma_c(x, y) \left[\sum_{n=1}^N \omega_n R_{n_c}(x, y) \right], \quad (13)$$

其中

3.4 无云雾图像的复原

利用 3.3 节算法得到更精确的 A 和 $t(x)$, 代入去雾成像模型中, 得到去雾后的图像, 若 k 为 0 时, 复原公式为

$$\gamma_c(x, y) = \eta \ln \left[\frac{\beta f_c(x, y)}{\sum_{C \in \{R, G, B\}} f_c(x, y)} \right], \quad (14)$$

式中: ω_n 为不同尺度 σ_n 分配的权重; $\gamma_c(x, y)$ 为 C 颜色通道的色彩恢复系数; η 为增益常数; β 为非线性强度的控制因子。

3.5 图像增强

基于 He 改进算法恢复的图像偏暗, 亮度值偏小, 需对恢复后的图像进行光补偿处理。为了对恢复的图像进行亮度校正, 采用自动色阶算法快速增强处理。自动色阶算法可自动去掉图像中过亮区域和过暗区域, 调节图像的亮度, 效果比较明显, 而且复杂度低, 速度快, 可实时处理^[20]。

4 仿真结果

提出了基于图像分割与改进暗原色结合的图像去雾算法, 该算法可有效解决不均匀遥感图像颜色失真和过度曝光的问题。为验证所提算法的有效性, 选取两张高分辨率遥感卫星图像(云雾分布不均匀)进行测试, 并对其进行分析。图 3(a) 中图像 1~3 的图像尺寸大小为 2557 pixel \times 4728 pixel, 算法设置参数为: $k=50$, $\omega=0.65$, $\eta=0.4$, $\beta=125$ 。

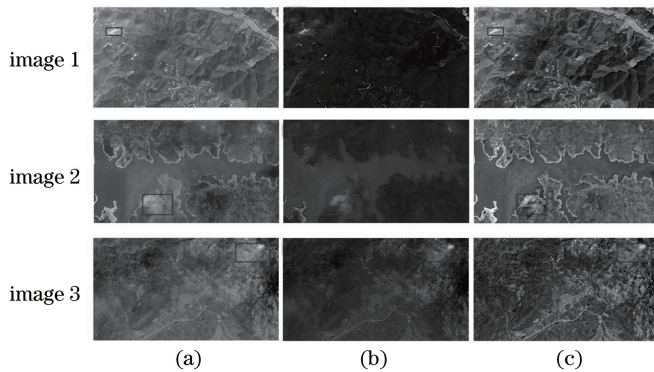


图 3 去雾前后结果。(a)原图;(b)文献[7]方法;(c)本文算法

Fig. 3 Results before and after defogging. (a) Original images; (b) algorithm in Ref. [7]; (c) proposed algorithm

4.1 主观比较

将所提算法得到的去雾效果图像与 He 原算法进行主观对比, 通过仿真实验, 图 3 分别给出本文算法和

He 原算法的去雾效果图。直观上看, 图 3 中图像 1 和 2 的原图中都包含不均匀的云雾, 在图中方框标记处。采用 He 原算法去雾处理后得到的图像较暗, 色彩失真

较严重,景物颜色不够鲜明,在浓雾部分细节处理不够,存在一定的误差。图3图像1浓雾区域经He算法处理后,出现过度曝光的现象,采用本文算法后,浓雾区域可得到较好的处理,避免出现曝光过度、色彩失真的现象。图3图像2采用本文算法后,局部区域得到增强,并且整体色彩比较协调。图3图像3的不均匀云雾较多,He算法处理后仍有较多未去除部分,本文算法不仅避免了浓雾部分过度曝光,还在细节处理上进行了局部增强,视觉效果较好。总体而言,本文算法的去云雾后图像整体比较明亮,协调一致,色彩较为真实,景物更为逼真,在浓雾部分细节处理较好,可满足战场环境侦察及目标判别的使用要求。

4.2 客观评估

为了更加客观地说明算法改进后的去雾效果,

表1 去雾效果定量评价

Table 1 Quantitative evaluation of defogging effect

Image	Index	SD	M	IE
1	Original image	844.4853	5.2605	6.8497
	Algorithm in Ref. [7]	618.9044	4.9610	6.0490
	Proposed algorithm	1636.3000	7.3937	7.1223
2	Original image	509.1185	3.8286	6.7309
	Algorithm in Ref. [7]	497.1766	3.8914	6.4045
	Proposed algorithm	983.6825	7.1025	7.2466
3	Original image	546.3753	3.9936	6.6576
	Algorithm in Ref. [7]	569.6587	4.0103	6.7118
	Proposed algorithm	993.8435	7.0508	6.9636

5 结 论

针对高分辨率遥感卫星图像不均匀云雾去除很难运用单一算法进行处理的情况,提出了一种基于图像分割技术和改进的暗原色先验理论的优化方法。利用图像分割技术,根据云雾的浓度,将原始遥感图像分割为淡雾部分和浓雾部分。浓雾部分采用加权多尺度Retinex算法进行局部增强处理;淡雾部分依据高分辨率卫星图像的成像特点,对暗原色先验方法进行改进,进一步优化算法,解决部分区域失真的问题;采用自动色阶法对图像进行增强,得到色彩饱和、对比度正常的图像;最后通过仿真实验对比He算法,从主观方面和客观方面对恢复的图像进行评价。实验结果表明,该方法在恢复图像细节和保持颜色方面具有良好的效果,可满足使用要求。该方法也有局限性,对于云雾分布不均匀复杂程度高的图像,图像分割复杂,处理速度较慢,实时性还需进一步改进,同时对云雾浓度较高的厚云雾无法进行处理。今后工作中将把精细分割云雾图的浓

从标准差(SD)、平均梯度(M)、信息熵(IE)三个角度对图像的质量进行定量分析。图像的标准差用于测量图像的对比度,反映图像整体灰度分布和色差程度,值越大,图像的颜色性能越好;图像的平均梯度反映图像的清晰度和纹理变化,可用来评估图像的模糊程度,值越大,细节性越好,纹理越清晰;信息熵是对图像整体信息量的度量,代表图像细节的丰富程度,值越大,图像质量越好,细节越丰富^[21-22]。表1列出了原始图像、文献[7]去雾效果及本文方法去雾效果的指标数据。可以看到,本文算法的标准差、平均梯度和信息熵数据都有一定程度的提升,表明得到的去雾图像灰度层次更加丰富,清晰度更高,细节信息更多,色彩饱和度更高,取得较好的去雾效果。

度、优化算法作为研究重点。

参 考 文 献

- [1] Shi Z S, Xie J. Simulation and analysis of the characters of maneuvering detection algorithm [J]. Computer Simulation, 2007, 24(9): 90-94.
石章松, 谢君. 机动检测算法特性分析仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(9): 90-94.
- [2] Zhang Z H, Feng W F, Wang T, et al. An improved aerial remote sensing image defogging method based on dark channel prior information [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2018, 35(2): 182-186.
张正豪, 冯伍法, 王涛, 等. 一种改进的基于暗原色先验信息的航空遥感图像去雾方法[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 182-186.
- [3] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100-110.
- [4] Wang R G, Zhang X, Zhang X L, et al. A novel

- adaptive Retinex algorithm for image enhancement [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2933-2936.
- 汪荣贵, 张璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究 [J]. *电子学报*, 2010, 38(12): 2933-2936.
- [5] Tarel J P, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C] // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, September 29-October 2, 2009, Kyoto, Japan. New York: IEEE, 2009: 2201-2208.
- [6] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image [C] // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE, 2008: 10139948.
- [7] 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.
- [8] Hide R. Optics of the atmosphere: scattering by molecules and particles [J]. *Physics Bulletin*, 1977, 28(11): 521.
- [9] Li X L, Wang Q Q, Yan L K. UAV remote sensing image de-hazing algorithm based on improved dark channel prior model [J]. *Video Engineering*, 2017, 41(1): 14-17.
- 李校林, 王屈桥, 燕历科. 基于改进暗通道先验模型的遥感图像去雾算法 [J]. *电视技术*, 2017, 41(1): 14-17.
- [10] Du M F, Sun H S. Research on dehaze algorithm of heterogeneous haze in UAV remote sensing image [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(1): 174-176, 180.
- 杜漫飞, 孙华生. 无人机遥感图像中不均匀雾霾的去除算法研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(1): 174-176, 180.
- [11] Haralick R M, Shapiro L G. *Computer and robot vision* [M]. New Jersey: Addison-Wesley Publishing Company, 1992.
- [12] Dong B G, Qin Z Y, Yang H Z, et al. Study on method of automatically extracting cirrus clouds and shadows in remote sensing images [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010, 33(5): 3-7.
- 董保根, 秦志远, 杨洪哲, 等. 遥感图像上朵云及阴影区域的自动提取方法研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2010, 33(5): 3-7.
- [13] Dong Z P, Wang M, Li D R, et al. A cloud detection method for high resolution remote sensing imagery based on the spectrum and texture of objects [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 996-1006.
- 董志鹏, 王密, 李德仁, 等. 利用对象光谱与纹理实现高分辨率遥感影像云检测方法 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 996-1006.
- [14] Cai L M, Wang L J. *Digital image processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 22-24.
- 蔡利梅, 王利娟. *数字图像处理* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 22-24.
- [15] Dai S B, Xu W, Piao Y J, et al. Remote sensing image defogging based on dark channel prior [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0328002.
- 代书博, 徐伟, 朴永杰, 等. 基于暗原色先验的遥感图像去雾方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0328002.
- [16] Wang D W, Yan W C, Liu Y, et al. Fast single image dehazing algorithm based on dark channel prior [J]. *Application Research of Computers*, 2018, 35(12): 3836-3840.
- 王殿伟, 闫伟超, 刘颖, 等. 基于暗原色先验的快速单幅图像去雾算法 [J]. *计算机应用研究*, 2018, 35(12): 3836-3840.
- [17] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [M] // Daniilidis K, Maragos P, Paragios N. *Computer vision-ECCV 2010. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 6311: 1-14.
- [18] Jiang J G, Hou T F, Qi M B. Improved algorithm on image haze removal using dark channel prior [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2011, 16(2): 7-12.
- 蒋建国, 侯天峰, 齐美彬. 改进的基于暗原色先验的图像去雾算法 [J]. *电路与系统学报*, 2011, 16(2): 7-12.
- [19] Su J P, Chen E J, Jing J S, et al. Haze removal algorithm based on threshold segmentation of dark channel prior [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(3): 205-210.
- 苏晋鹏, 陈恩俊, 景嘉帅, 等. 基于阈值分割的暗原色先验图像去雾方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(3): 205-210.
- [20] Deng L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 892-901.
- 邓莉. 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 892-901.
- [21] Wang Y. Research on adaptive fast dehazing

- algorithm for single remote sensing image [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018: 21-22.
- 王耀. 单幅遥感图像自适应快速去雾算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018: 21-22.
- [22] Lu H B, Zhao Y F, Zhao Y J, et al. Image defogging based on combination of image bright and dark channels[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115004.
- 卢辉斌, 赵燕芳, 赵永杰, 等. 基于亮通道和暗通道结合的图像去雾[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1115004.