

文章编号 1004-924X(2019)01-0181-10

## 结合颜色线和暗通道的遥感图像去雾

张 峥, 李 奇\*, 徐之海, 冯华君, 陈跃庭

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**为了解决遥感图像中存在雾气引起图像可见度下降的问题,提出一种基于颜色线先验和暗通道先验的遥感图像去雾算法。针对颜色线先验对部分场景不适用的情况,提出一种基于最小二乘的透过率优化方法,通过计算先验可信度权重来加权融合颜色线先验和暗通道先验估计的透过率图,以获得更为准确的透过率分布。为了避免 halo 效应,在优化方程中加入梯度正则化约束。实验结果表明,本方法对透过率估计准确,重建结果清晰度提升明显。另外,该方法改善了客观评价指标,其灰度平均梯度(GMG)和信息熵(IE)平均值最高,取得了最佳的重建效果。

**关键词:**图像去雾;颜色线先验;暗通道先验;遥感图像;最小二乘法

中图分类号:TN911.73 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192701.0181

## Color-line and dark channel based dehazing for remote sensing images

ZHANG Zheng, LI Qi\*, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, CHEN Yue-ting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

\* Corresponding author, E-mail: liqi@zju.edu.cn

**Abstract:** A color-line and dark channel based dehazing algorithm was proposed to solve the problem of image contrast decreasing caused by haze in remote sensing images. In view of the deficiencies in the color-line a priori, a least squares based transmittance optimization method was proposed. In order to obtain a more accurate transmittance distribution, the transmissivity maps estimated by the color-line prior and the dark channel prior are fused by weight which is calculated by their credibility. A gradient regularization constraint was added to the optimization equation to avoid the halo effect. The experimental results show that the proposed method is accurate in estimating transmittance and the clarity of the reconstruction results is significantly improved. In addition, the objective evaluation index is improved as its Gray Mean Grads(GMG) and Information Entropy(IE) show the highest average value, which indicates that the proposed method has achieve the best reconstruction result among the state-of-art methods.

**Key words:** image dehazing; color-line prior; dark channel prior; remote sensing images; least squares

收稿日期:2018-06-08;修订日期:2018-08-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61475135);民用航天预研项目资助

## 1 引言

随着航空航天技术的发展,遥感越来越多地被应用于城市测绘、气象预测和资源探测等领域,成为获取空间信息的一种有效手段。为了取得较好的观测效果,遥感系统大多选择在能见度好且光照理想的情况下进行成像,拍摄时间受到限制<sup>[1]</sup>。在灾害监测或紧急救援等实际应用中,需要及时地对事发地点进行拍摄,成像质量经常受到雾霾等天气状况影响而发生退化,影响观测效果。因此,消除雾霾对光学遥感的影响,对于提升遥感成像能力具有重要意义。

Narasimhan 和 Nayar<sup>[2]</sup>指出,雾天场景外貌是经过衰减后的真实场景亮度和大气光的线性组合,混合比例取决于场景到传感器的深度和雾气的散射系数。因此,从单张含雾图像反向求解无雾场景的过程是一个未知数大于方程数的不定方程,需要通过先验信息获取雾气分布或者用图像方法得到近似解。

常见去雾方法可以分为基于物理模型和非物理模型的两大类。非物理模型的方法不以恢复真实场景为目的,主要根据视觉感受改善图像的质量,属于图像增强的范畴,包括彩色增强方法<sup>[3]</sup>、对比度增强法<sup>[4]</sup>、retinex 算法<sup>[5]</sup>等;基于物理模型的方法<sup>[6-13]</sup>利用大气传输模型,通过求解图像降质物理过程的逆过程来恢复清晰图像,属于物理复原的范畴。何恺明<sup>[8]</sup>等提出暗通道先验,即对于无雾的室外图像,任意的局部块内至少有一个像素在 RGB 某个通道中包含一些亮度非常低的像素,因此可以通过最小化局部区块中的像素来估计透过率。使用软抠图或导向滤波<sup>[16]</sup>的方法得到精细的透过率,代入散射模型重建清晰图像。这种方法对多数户外图像效果不错,但部分图像存在透过率估计偏高的情况,导致去雾不完全。另外,精细化透过率图的过程会引入图像细节成分,使得重建图像部分高光细节丢失。利用暗通道先验,研究者们提出多种改进算法。武昆<sup>[11]</sup>等提出结合提升小波和引导滤波的多尺度透过率优化方法,实现平滑图像细节的同时保持边缘不模糊。邓莉<sup>[12]</sup>等提出自适应

参数的全局去雾算法,增强暗通道先验对明亮区域的适用性。吴斌<sup>[13]</sup>等提出使用自适应各向异性高斯低通滤波获取图像雾气分布,提高处理效率。这些方法获得了较好的效果,但仍受暗通道先验适用性的影响。Meng<sup>[9]</sup>等人提出了一种基于边界限制的去雾方法,将对透过率函数的边界约束与基于 L1 范数的加权正则化方法相结合,建模成优化问题来估计透过率分布。该方法去雾效果比较明显,但重建结果存在过饱和现象。Berman<sup>[10]</sup>等人认为无雾图像的颜色可由多个颜色聚类近似,每个聚类中的像素分散在整个像平面且可能覆盖各种深度。存在雾霾时,颜色聚类中不同像素由于不同透过率变成颜色空间中的线,利用这些颜色线可以计算得到透过率图和无雾图像。该算法恢复结果色彩比较鲜明,但受到图像颜色分布情况影响,有时局部透过率估计会出现较大的误差,与真实场景不符。

相对于考虑局部特征的暗通道先验,颜色线先验的非局部特性使得透过率估计更为准确。但受到图像本身影响,当某种颜色的像素数过少或一条颜色线上的像素均受雾霾影响时,透过率估计会出现偏差。针对这一问题,本文提出一种边缘保持的透过率优化方法,通过计算颜色线先验可信度得到权重分布,通过权重控制不同像素的透过率与两种先验所得透过率图的相似程度,同时用原图的梯度信息来控制透过率边缘,以避免 halo 效应。通过结合两种先验信息,本方法可以更为准确地估计雾气分布情况,从而恢复出清晰无雾的图像。

## 2 基本原理

### 2.1 大气散射模型

在静态雾霾天气中成像时,从场景反射或发射的光线被悬浮在空气中的微小悬浮颗粒物改变,其中一部分被悬浮粒子吸收,另有一部分被悬浮粒子散射。特别地,由于多重散射对成像的影响只有在雾霾非常浓密时才会明显,本文只考虑吸收和单次散射对光线传输的影响。

雾霾对场景反射的光线有明显地衰减作用。

根据 Allard 定律<sup>[14]</sup>,点光源发射的光线经过场景深度为  $d$  的介质后的强度变化为:

$$I_s = \frac{I_0 e^{-\beta d}}{d^2}, \quad (1)$$

其中:  $I_s$  为衰减后的亮度,  $\beta$  为衰减系数,  $I_0$  为点光源亮度, 可以表示为大气光  $I_\infty$  值与该点场景反射率  $\rho$  的乘积。所有散射能量被认为从入射能量中移除, 不考虑向前散射的能量。

此外,雾中成像还受到大气光的影响。空气中悬浮的颗粒拦截大气光并将其部分朝向相机散射, 等效于形成一个附加光源。这一部分光与场景无关, 可以定义为雾气值  $V$ 。雾气值强度取决于该位置的衰减系数和场景深度, 可以用 Koschmieder 定律表示:

$$V = I_\infty(1 - e^{-\beta d}). \quad (2)$$

在含雾图像中, 场景亮度由衰减后的场景亮度和雾气值两部分线性组合而成:

$$I = I_s + V = \frac{I_0 e^{-\beta d}}{d^2} + I_\infty(1 - e^{-\beta d}). \quad (3)$$

由于存在  $d^2$  衰减项, 不能直接从含雾图中直接估计出真实场景反射率  $\rho$ 。因此只能估计像平面的“等效”场景反射率, 即通过重新定义场景反射率  $\tilde{\rho} = \rho/d^2$  以包含衰减效应, 这也称为归一化辐射<sup>[2]</sup>。式(3)可化为:

$$I = I_\infty \tilde{\rho}(x) e^{-\beta d} + I_\infty(1 - e^{-\beta d}). \quad (4)$$

由于不同区域的衰减系数和场景深度均未知, 恢复时只需计算透过率, 即  $t = e^{-\beta d}$ 。定义像平面等效的清晰场景亮度  $J = I_\infty \tilde{\rho}(x)$ , 式(4)可化为:

$$I = Jt + I_\infty(1 - t). \quad (5)$$

因此, 去雾的主要工作是从含雾图像中估计出透过率  $t$  和大气光值  $I_\infty$ , 从而恢复出清晰场景亮度:

$$J = \frac{I - I_\infty(1 - t)}{t}. \quad (6)$$

## 2.2 暗通道先验

通过对大量户外照片进行研究, 何恺明<sup>[8]</sup>等人发现, 无雾图像非天空区域的任意局部窗口中, 往往存在某一通道灰度值很低的像素, 这个现象称为暗原色先验。对于任意图像  $J$ , 其暗通道  $J_{\text{dark}}$  可以表示为:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} J_c(y)), \quad (7)$$

其中:  $\Omega(x)$  是图像中以  $x$  为中心的一个局部窗口;  $J_c$  是图像  $J$  的  $r, g, b$  三个颜色通道中的任一通道。何恺明<sup>[8]</sup>等对 5 000 幅随机挑选的户外无雾图像进行验证, 约 75% 的暗通道像素值为 0, 约 90% 的暗通道像素值小于 25, 证明该先验普遍适用于大部分户外图像。

对式(5)两边取最小化操作, 可以得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J_c(y)}{I_\infty} \right] = \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J_c(y)}{I_\infty} \right] t(x) + 1 - t(x), \quad (8)$$

由于暗通道  $J_{\text{dark}}$  值接近于 0, 由式(8)可求得透过率为:

$$t_d(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J_c(y)}{I_\infty} \right], \quad (9)$$

其中  $t_d$  代表暗通道方法得到的透过率。

## 2.3 颜色线先验

Orchard<sup>[15]</sup>等提出, 清晰图像可以用数百种不同的颜色来近似, 这些颜色在 RGB 空间中形成独立的紧密聚团。图 1(a) 是晴朗天气拍摄的城市地区遥感图, 可见度情况良好, 可认为没有云雾影响。使用 K-means 方法将图像中的颜色聚类成 1 000 种不同类型, 选取其中 3 种类型分别使用红绿蓝 3 种符号进行标记。可以看到 3 种类型的像素随机分布在图像中的不同位置, 从图 1(b) 中可见 3 种类型的像素在 RGB 空间各自形成紧密的聚团。使用图 1(a) 的清晰无雾图像, 仿真得到雾气影响的图像, 如图 1(c) 所示, 其中像素标记与图 1(a) 一致。当受到雾气影响时, 颜色聚团中各像素的颜色因为所在位置雾气浓度不同而变化不一, 形成一条由初始颜色指向大气光颜色的颜色线, 如图 1(d) 所示。这些像素在线上的具体位置与该点的透过率相关, 因此可以使用颜色线来估计出逐像素的透过率分布。区别于暗通道先验, 该方法并非将图像分成不同的小块并从中获取透过率, 而是从全局的角度获得逐像素的透过率分布, 因此结果鲁棒性更好<sup>[10]</sup>。

利用颜色线估计透过率, 第一步是获得图像中不同颜色线的聚类。使用何恺明<sup>[8]</sup>等人的方法估计大气光值  $I_\infty$ , 然后定义颜色线向量  $C_l$  为:

$$C_l(x) = I(x) - I_\infty. \quad (10)$$

通过坐标转换, 得到以大气光值  $I_\infty$  为原点,

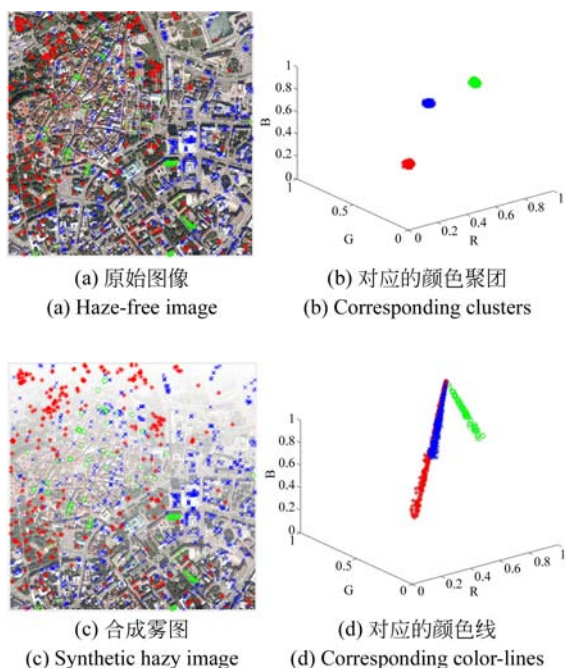


图 1 颜色线示意图

Fig. 1 Diagram of color-lines

向空间各个方向延伸的颜色线向量  $C_l$ 。对空间经纬度  $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$  进行均分不能得到空间上的均匀采样<sup>[17]</sup>, 而应该对归一化颜色向量所对应的球面面积进行均分, 将顶点位置选为每组的最终方向。对于待处理图像中得到的颜色向量, 归一化得到颜色方向  $\tilde{C}_l$ , 然后使用 k-means 算法进行聚类, 选择最接近的方向作为该像素的颜色聚类。

确定颜色聚类后, 根据所在颜色线上的相对位置来计算该像素所在位置的透过率。对于颜色线上的每个点, 可以计算得到相对于大气光值的距离  $d$ :

$$d(x) = t(x) \| \mathbf{J}(x) - \mathbf{I}_c \| . \quad (11)$$

当像素没有受到雾气影响, 即  $t=1$  时, 可以得到无雾颜色对应的距离值  $d_{\max}$ :

$$d_{\max} = \| \mathbf{J} - \mathbf{I}_c \| . \quad (12)$$

结合式(11)和式(12)可以得到透过率计算公式(13):

$$t(x) = d(x)/d_{\max}. \quad (13)$$

在实际操作中, 将每个像素聚类中距离最大点设为无雾颜色对应的距离值:

$$d_{\max} = \max_{x \in H} \{d(x)\}, \quad (14)$$

其中  $H$  为每个颜色线聚类。利用颜色线先验计

算得到透过率为:

$$t_h(x) = d(x)/d_{\max}. \quad (15)$$

### 3 改进的方法

#### 3.1 边缘保持的透过率优化方法

在一些情况下颜色线先验会出现估计误差, 因此可以结合暗通道先验所得的透过率图来获取更准确地透过率估计。优化的目标是获得一个整体平滑的透过率图, 但是在边缘部分尽量保持原图的形状, 以避免 halo 效应。根据颜色线先验的适用情况计算可信度权重  $\omega$ , 使得权重较大的像素的透过率与雾线得到的透过率  $t_h$  尽量相似, 而权重较小的像素的透过率与暗通道得到的透过率  $t_d$  更为相似, 数学表达式为:

$$\min_t \sum (\omega(t - t_d)^2 + (1 - \omega)(t - t_h)^2 + \lambda \left[ a_x \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + a_y \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 \right]), \quad (16)$$

其中:  $x, y$  分别为行方向和列方向,  $\omega$  为可信度权重。  $a_x, a_y$  为平滑权重系数<sup>[18]</sup>, 该系数与边缘梯度变化程度负相关, 以保留图像的结构信息, 避免去雾结果中出现 halo 效应:

$$a_x = \left[ \left( \frac{\partial g}{\partial x} \right)^2 + \epsilon \right]^{-1}, a_y = \left[ \left( \frac{\partial g}{\partial y} \right)^2 + \epsilon \right]^{-1}, \quad (17)$$

其中  $g$  为原图的亮度图。式(16)可改写为矩阵形式:

$$\min_t ((t - t_d)^T \mathbf{W}_d (t - t_d) + (t - t_h)^T \mathbf{W}_h (t - t_h) + \lambda (t^T \mathbf{D}_x^T \mathbf{A}_x \mathbf{D}_x t + t^T \mathbf{D}_y^T \mathbf{A}_y \mathbf{D}_y t)), \quad (18)$$

其中:  $t, t_d$  和  $t_h$  都是  $\mathbf{R}^{NM}$  空间中的向量。矩阵  $\mathbf{W}_d, \mathbf{W}_h, \mathbf{A}_x, \mathbf{A}_y \in \mathbf{R}^{NM \times NM}$  是分别以权重  $\omega$  和  $(1 - \omega)$ 、平滑权重  $a_x$  和  $a_y$  为对角线元素的对角矩阵,  $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y \in \mathbf{R}^{NM \times NM}$  是离散微分算子。

要获得式(18)的最小值,  $t$  需要满足如下:

$$t = (\mathbf{I} + \lambda \mathbf{L}_g)^{-1} (\mathbf{W}_d t_d + \mathbf{W}_h t_h), \quad (19)$$

其中  $\mathbf{L}_g = \mathbf{D}_x^T \mathbf{A}_x \mathbf{D}_x + \mathbf{D}_y^T \mathbf{A}_y \mathbf{D}_y$ 。

#### 3.2 权重计算

颜色线先验的全局特性使得该方法在多数情况下能获得更好的透过率估计<sup>[10]</sup>, 因此在权重计算时考虑将该先验适用的像素的权重设为较大值, 而将其他不适用像素的权重设为较小值。

颜色线先验的适用性首先受到像素数的影

响。当一种颜色线上的像素过少时,容易因为随机误差导致估计错误,因此可以利用像素数计算第一项权重值:

$$\omega_1(x) = \min(1, \text{count}(\mathbf{H})/100), \quad (20)$$

其中  $\text{count}()$  函数计算颜色线  $H$  中的像素总数。

其次,透过率估计的准确程度取决于距离最大值  $d_{\max}$  的准确程度。当某种颜色线上像素的透过率均较小时,算法获得的用于估计透过率的  $\hat{d}_{\max}$  值也会偏小,计算得到的  $t_h$  值会偏大。图 2(a) 是一幅薄雾笼罩的城镇遥感图,图 2(c) 是其  $\hat{d}_{\max}/\|I_\infty\|$  值分布图(彩图见期刊电子版)。从中可以看到红色方框处的绿色植被像素  $\hat{d}_{\max}$  值偏小,引起图 2(e) 中估计得到的透过率  $t_h$  过大,导

致图 2(f) 的去雾结果中该植被区域去雾效果不佳,对比度明显低于附近区域。因此,可以用  $\hat{d}_{\max}$  的相对长度来衡量第二项可信赖权重:

$$\omega_2(\mathbf{x}) = \max(0, 1 - (d_{th}/(\hat{d}_{\max}/\|I_\infty\|))^p), \quad (21)$$

其中:  $d_{th}$  为相对长度阈值,当相对长度低于该阈值时权重较小,本文中取为 0.65。  $p$  为调节指数,本文中取为 10。对图 2(a) 计算第二项权重分布得到图 2(d),用此权重来优化透过率得到图 2(g),其中植被区域的透过率值得到了有效的校正。利用该透过率图,最终得到去雾结果图 2(h) 所示,可见在植被区域获得了明显的去雾效果,同时也在其他区域也保持了较好的对比度。

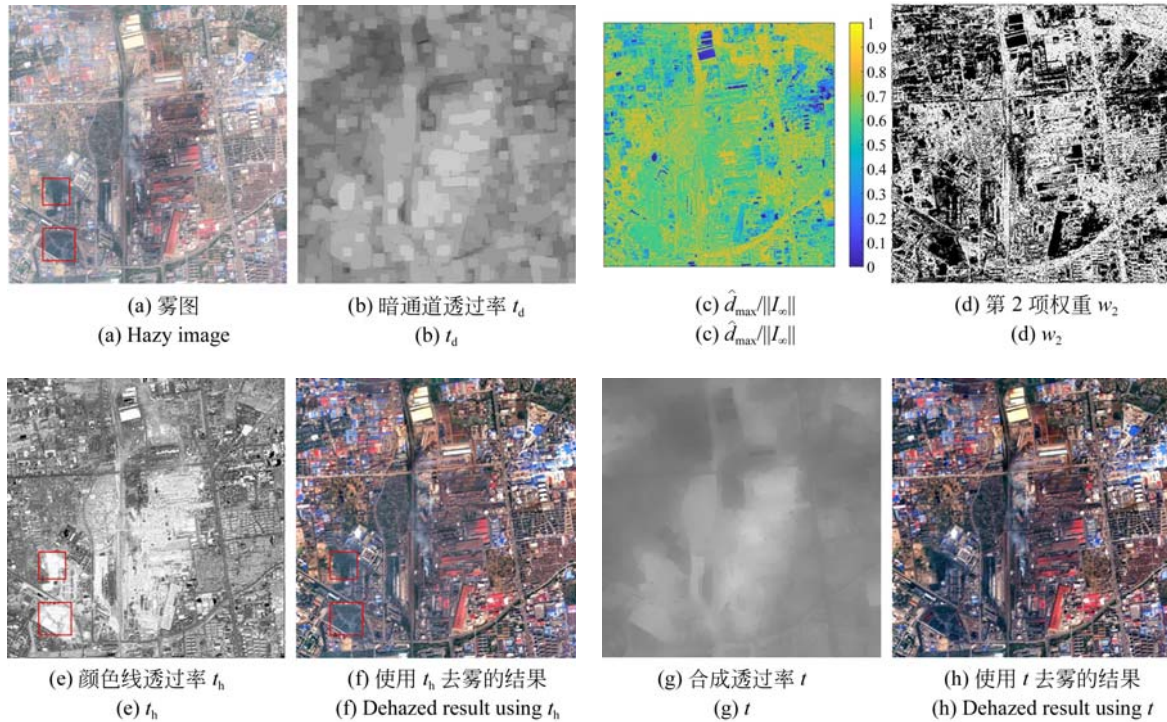


图 2 第 2 项权重示意图

Fig. 2 Diagram of the second weight  $\omega_2$

另外,考虑复原图像  $J$  的非负性,根据复原结果中颜色信息丢失的情况来确定第 3 项权重值。计算使用预估的透过率得到的复原图像的 RGB 值,若出现非负值则将权重置为 0:

$$\omega_3(x) = \begin{cases} 1, & \min_{c \in \{r, g, b\}} (I_c(x) - I_\infty \cdot (1 - t_h(x))) > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

如图 3 所示,对图 3(a) 使用颜色线先验估计得到的透过率  $t_h$  值过低,导致图 3(f) 中的去雾结果亮度过暗且颜色饱和度过高,部分像素出现信息丢失的情况,影响正常观测。利用图 3(b) 的  $\omega_3$  权重,结合图 3(c) 和图 3(e) 这两个不同先验估计得到的透过率图,优化得到透过率分布见图 3(g),最终去雾效果如图 3(h) 所示。可以看到,通过使用权重对非负值情况进行限

制,有效控制了颜色线先验估计错误引起的图像信息丢失,同时相比图 3(d)中单纯利用暗通

道先验的方法更好地补偿了云雾带来的对比度降低。

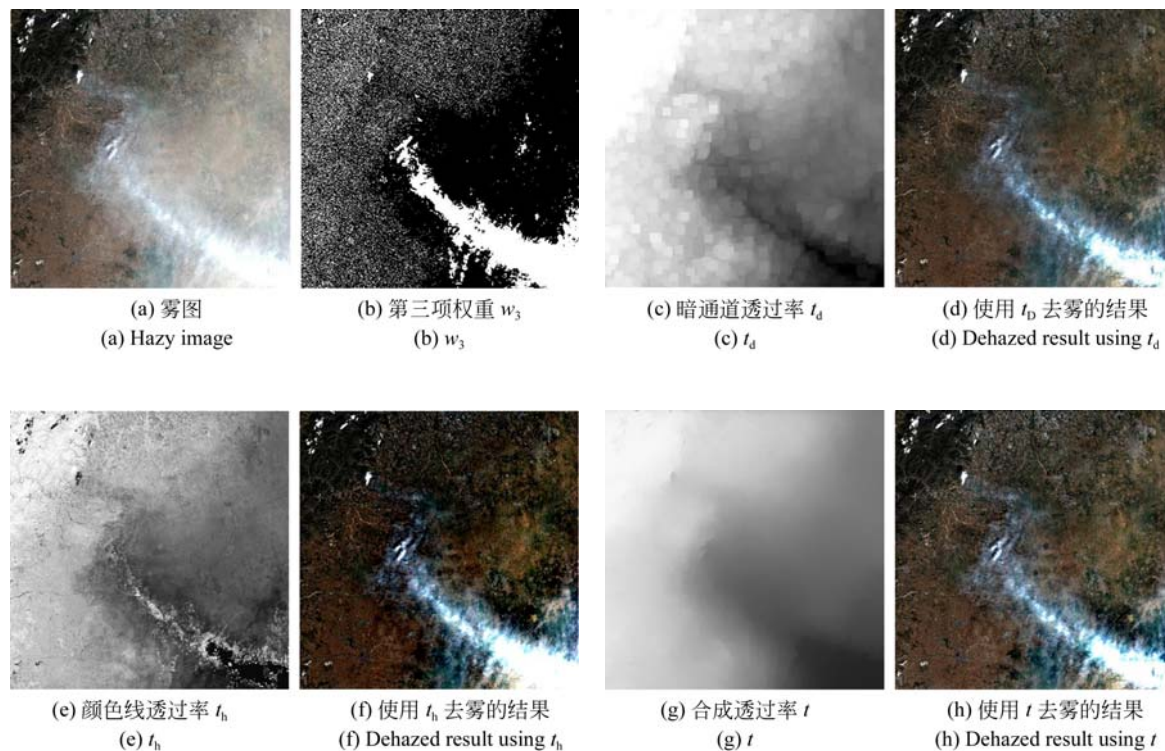


图 3 第 3 项权重示意图

Fig. 3 Diagram of the third weight  $w_3$

最终权重值为 3 项权重的累乘结果:

$$w(x) = w_1(x)w_2(x)w_3(x). \quad (23)$$

## 4 实验结果与分析

使用上述算法对含雾遥感图像进行测试,并与何恺明<sup>[8]</sup>的算法, Meng<sup>[9]</sup>的算法和 Berman<sup>[10]</sup>的算法进行了对比,从主观和客观两个方面分别对去雾效果进行评价。

### 4.1 主观评价

不同场景的遥感图像去雾结果如图 4~图 7 所示(彩图见期刊电子版)。图 4(a)是一幅雾天得到的俯拍图,对其进行去雾处理得到图 4(b)~图 4(e)。可以看到何恺明<sup>[8]</sup>的算法对前景的去雾效果较好,但是远处仍有雾感,树丛区域对比度偏低。Meng<sup>[9]</sup>的算法效果略逊于何恺明<sup>[8]</sup>的算法,树丛处的雾气残留更加明显。Berman<sup>[10]</sup>的结果整体效果较好,尤其是树丛处去雾效果好于前

两种方法,但前景处去雾效果相对较差,图像左下角红色屋顶处仍有雾感。本文方法更为彻底地去除了图像各个位置的雾气,得到清晰自然的重建结果。

图 5(a)是一幅工厂上空的遥感图,对其进行去雾处理得到图 5(b)~图 5(e)。可以看到何恺明<sup>[8]</sup>的算法基本消除了烟雾现象,但仍有一定的烟雾残留,可以看到红框中条纹地物的图像对比度偏低,细节不清晰。Meng<sup>[9]</sup>的算法对大气光选取出现偏差,导致全图出现明显的偏色现象,视觉效果不佳。Berman<sup>[10]</sup>的方法有一定的去雾效果,但图像总体泛白,可以看到蓝色屋顶区域有明显的雾气残留。相比较下,本文算法恢复出最多的细节,获得了理想的去雾效果。

图 6(a)是一幅薄雾天气拍摄的城镇区域遥感图,对其进行去雾处理得到图 6(b)~图 6(e)。其中何恺明<sup>[8]</sup>的方法对植被区域雾气去除效果较好,但在建筑区域的去雾效果不如其他方法明显,

图像泛白且对比度偏低。Meng<sup>[9]</sup>的结果中雾气去除比较彻底,但是图像整体色调变得偏暗黄,看起来不太自然。Berman<sup>[10]</sup>的重建结果中建筑区域的

清晰度较高,但局部区域亮度偏高,而且植被区域留有明显的雾气。相比较而言,本文算法得到的去雾结果的图像清晰度最佳,去雾效果更自然。

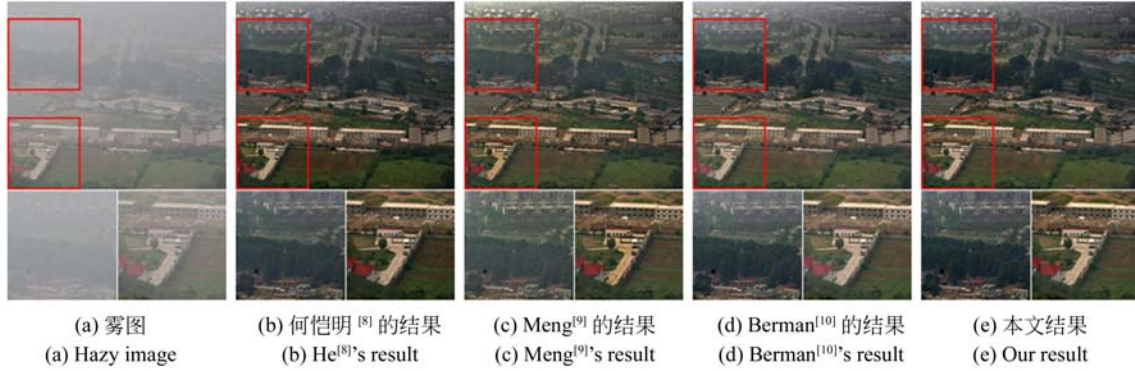


图 4 去雾效果对比

Fig. 4 Comparison with other methods

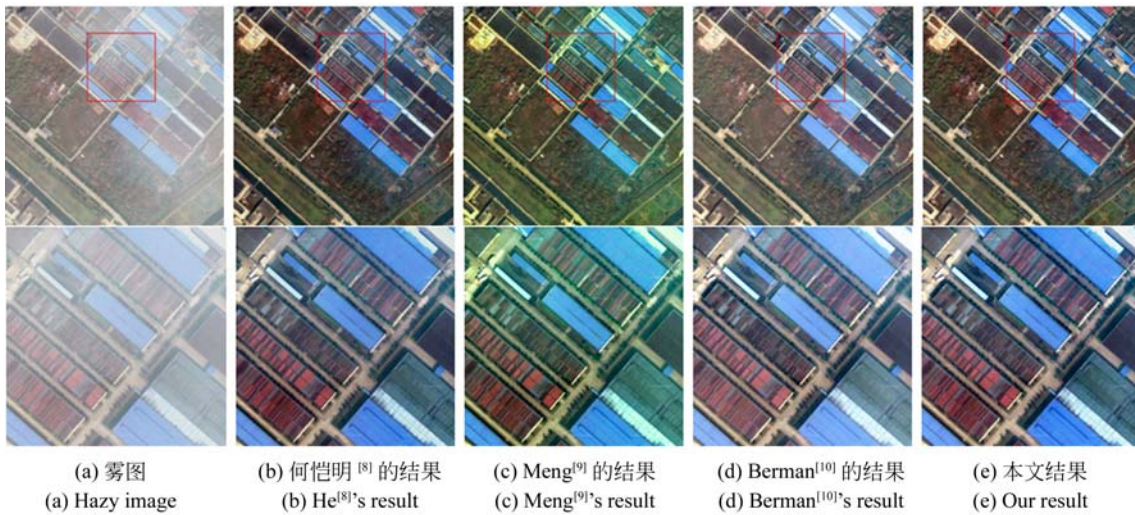


图 5 去雾效果对比

Fig. 5 Comparison with other methods

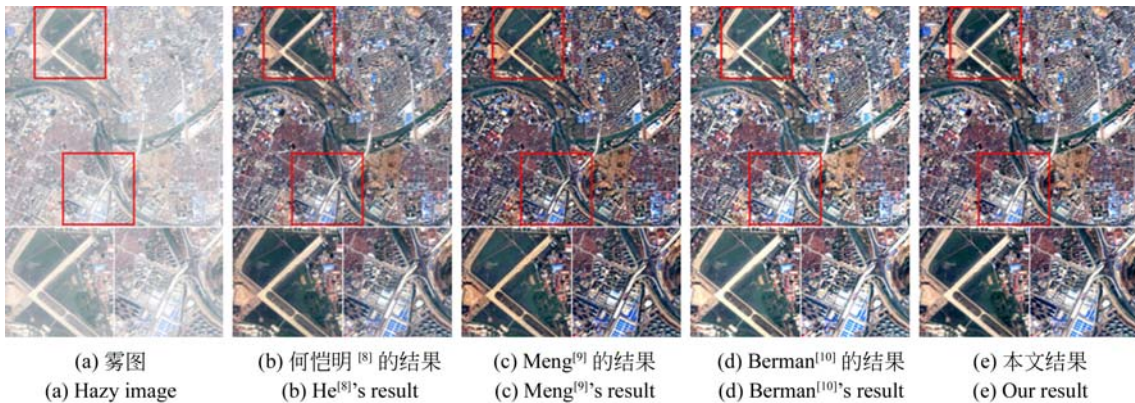


图 6 去雾效果对比

Fig. 6 Comparison with other methods

图 7 中对比了不同类型地物遥感图的去雾结果,可以看到本文方法能够有效地补偿雾气带来的图像对比度下降,重建出颜色鲜明的无

雾图像,提升遥感图像的可见度。本文的结果中雾气残留少于其他方法,并且没有出现明显的偏色现象。

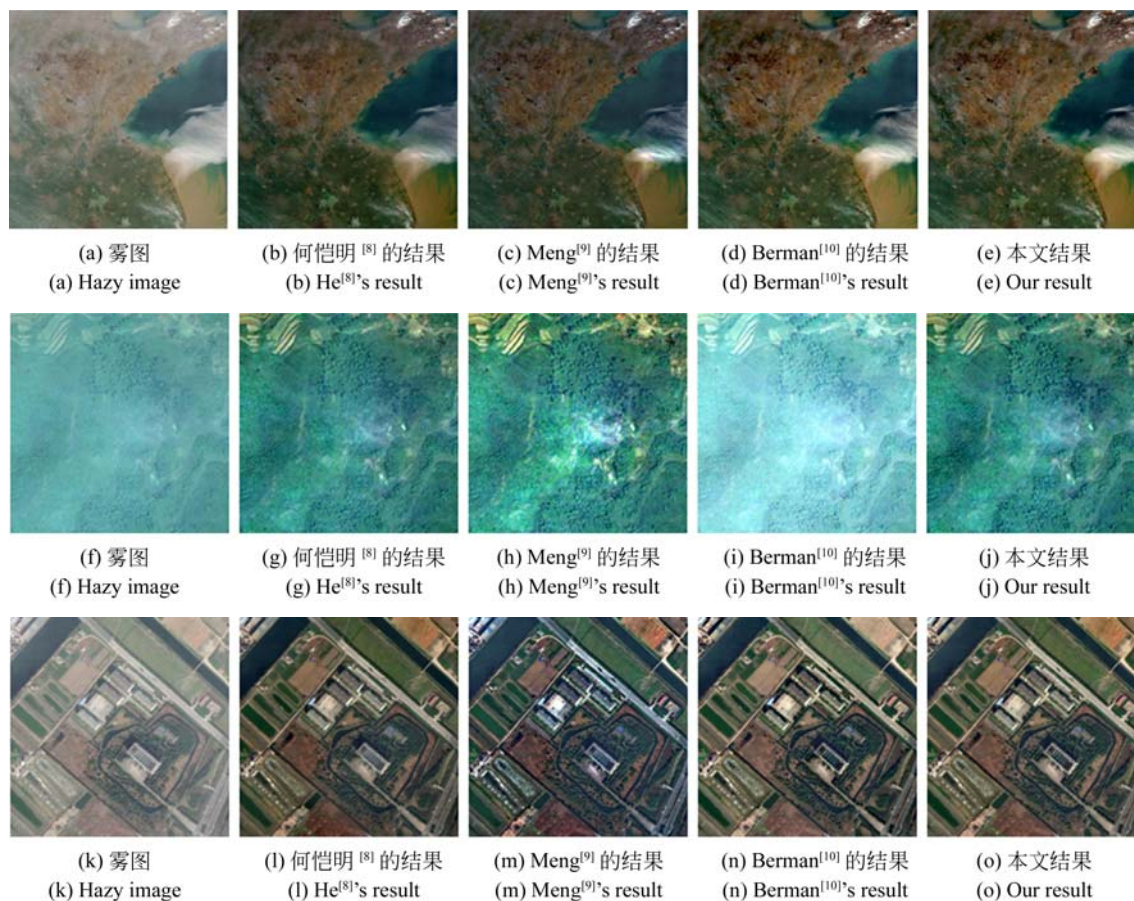


图 7 去雾效果对比

Fig. 7 Comparison with other methods

## 4.2 客观评价

为了客观比较算法的准确性,使用灰度平均梯度(Gray Mean Grads, GMG)和信息熵(Information Entropy, IE)两个评价指标衡量仿真结果的清晰度,结果如表 1 所示。可以看到,本文算法在不同图像上都取得了较好的去雾效果,重建图像的清晰度和所含信息量相对于其他方法有一定程度的提升,仅在个别图上略逊于其他方法。总体上,本文方法效果更佳,与主观评价结果一致。

各算法的处理时间参见表 2。从算法的运行时间来看,文献[8]的运算复杂度最低,因为透过率估计过程使用导向滤波,该方法可以用积分图来加速运算。本文方法计算复杂度略低于文献[10]的方法,因为本文使用的大气光估计方法的

表 1 评价指标比较

Tab. 1 Comparison of evaluation index

图像	评价指标	文献[8]	文献[9]	文献[10]	本文
图 4	IE	7.011	6.881	6.973	6.947
	GMG	0.021 7	0.023 8	0.021 9	0.024 2
图 5	IE	7.212	7.238	7.195	7.305
	GMG	0.018 5	0.020 5	0.019 0	0.020 6
图 6	IE	7.560	7.636	7.538	7.682
	GMG	0.039 4	0.052 1	0.054 0	0.050 2
图 7(a)	IE	6.798	6.483	7.016	7.024
	GMG	0.023 2	0.024 4	0.029 8	0.030 3
图 7(f)	IE	7.157	7.458	6.776	7.348
	GMG	0.029 1	0.044 7	0.017 0	0.034 3
图 7(k)	IE	7.192	7.199	7.305	7.429
	GMG	0.026 7	0.038 7	0.031 9	0.034 6

计算复杂度较低。文献[9]的运算复杂度最高,因为该方法中大气光估计方法的算法复杂度较高,另外透过率估计需要进行多次迭代运算。

表2 计算时间比较

Tab. 2 Comparison of calculation time (s)

图像尺寸	文献[8]	文献[9]	文献[10]	本文
500×500	2.60	0.25	1.07	0.95
1 000×1 000	7.85	1.05	4.68	4.12
2 000×2 000	26.98	4.16	19.93	17.86

#### 参考文献:

- [1] 陶叔银. 基于大气物理特征的光学图像退化及补偿技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.  
TAO SH Y. *Research on image degradation and recovery based on physical properties of atmosphere*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [2] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Vision and the atmosphere[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 48(3): 233-254.
- [3] RIZZI A, GATTA C, MARINI D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(11): 1663-1677.
- [4] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008. IEEE, 2008: 1-8.
- [5] 陈志斌, 张超, 宋岩, 等. 灰度拉伸 Retinex 在大动态范围烟雾图像增强中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 3146-3150.  
CHEN ZH B, ZHANG CH, SONG Y, *et al.*. Application of Retinex with grayscale stretching in large dynamic range smoke image enhancement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3146-3150. (in Chinese)
- [6] FATTAL R. Single image dehazing[J]. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 2008, 27(3): 72.
- [7] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *Computer Vision*, 2009 IEEE 12th International Conference on. IEEE, 2009: 2201-2208.
- [8] 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.
- [9] MENG G, WANG Y, DUAN J, *et al.*. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2013: 617-624.
- [10] BERMAN D, AVIDAN S. Non-local image dehazing[C]. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016: 1674-1682.
- [11] 武昆, 韩广良, 杨航, 等. 多尺度引导滤波及其在去雾中的应用[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2182-2194.  
WU K, HAN G L, YANG H, *et al.*. Multi-scale guided filter and its application in image dehazing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(8): 2182-2194. (in Chinese)
- [12] 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.  
DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 892-901. (in Chinese)
- [13] 吴斌, 付辉, 张红英. 大气光雾图像的清晰度复原[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 2018-2026.  
WU B, FU H, ZHANG H Y. De-hazing of atmosphere veil haze images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2018-2026. (in Chinese)
- [14] ALLARD É. *Mémoire sur l'intensité et la portée des phares* [M]. Impr. nationale, 1876.

## 5 结 论

本文针对颜色线先验的缺陷,使用暗通道先验信息进行补充,结合两种先验来估计透过率图。提出一种边缘保持的透过率优化方法,通过计算可信度权重来加权融合颜色线先验和暗通道先验所得的透过率图,以获得更为准确的透过率估计。同时利用原图的边缘信息进行约束,避免引入 halo 效应。对不同的含雾遥感图像进行实验,从主观评价和客观评价两方面进行分析,证明了本文算法能有效补偿雾气引起的对比度下降,重建得到清晰图像。

- [15] ORCHARD M T, BOUMAN C A. Color quantization of images[J]. *IEEE transactions on signal processing*, 1991, 39(12): 2677-2690.
- [16] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [C]. *European conference on computer vision*. Springer Berlin Heidelberg, 2010: 1-14.
- [17] MARSAGLIA G. Choosing a point from the surface of a sphere[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1972, 43(2): 645-646.
- [18] FARBMAN Z, FATTEL R, LISCHINSKI D, et al.. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation [C]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, 2008, 27(3): 67-77.

#### 作者简介:



张 峥(1992—),男,浙江台州人,博士研究生,2014 年于浙江大学获得学士学位,主要从事图像质量评价、图像增强等方面的研究。Email: 11430016@zju.edu.cn



李 奇(1973—),男,江苏沛县人,教授,博士生导师,2004 年于浙江大学获得博士学位,现为浙江大学光学成像工程研究所副所长,主要从事成像系统、遥感等方面的研究。Email: liqi@zju.edu.cn