

# 基于暗原色先验理论的大气能见度测量

赵瑞 胡辽林 赵江涛

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 基于暗原色先验理论在图像的去雾方面有非常好的效果,提出了一种将暗原色先验理论用于大气能见度测量的方法,克服了气象能见度仪成本昂贵且难以大范围架设的缺点。对拍摄雾霾图像的不同区域进行亮度分析以便选择合适的目标区域进行透射率估计,通过优化去雾系数并使用引导滤波细化透射率获取较为准确的透射率,从而求得大气消光系数及大气能见度。将大量雾霾图像处理的结果与前向散射仪(CJY-1G)测量的数据进行比较,二者基本一致,本方法与CJY-1G测量结果的误差在±15%之内,符合能见度观测的应用要求。

**关键词** 大气光学; 大气能见度; 图像处理; 暗原色先验理论; 消光系数

**中图分类号** TN241; TP391.41 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.060103

## Atmospheric Visibility Measurement Based on Dark Channel Prior

Zhao Rui Hu Liaolin Zhao Jiangtao

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

**Abstract** Dark channel prior has a good effect on haze removing. A visibility measurement method based on dark channel prior is proposed, which can overcome the disadvantages of high cost and difficulty in building up of the meteorological visibility meter. The proper target region is selected by analyzing different regions of the image so as to estimate transmittance. A more accurate transmittance is obtained by haze removal parameter optimization and guided filtering refinement, and then the atmospheric extinction coefficient and visibility are inferred. Comparing the results of dark channel prior with the data measured by forward scattering meter (CJY-1G), the error is within ±15%, which meets the application requirement of World Meteorological Organization.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric visibility; image processing; dark channel prior; extinction coefficient

**OCIS codes** 010.7295; 010.1320; 010.1319; 100.2000

## 1 引言

大气能见度从目标物能否被看见和辨认的角度,用“距离”来描述大气透明度或浑浊度,故该距离是大气光学和气象学的一个重要物理量。当出现降雨、雾霾、沙尘暴等天气时,大气透明度较低,能见度较差,严重影响市民的日常生活,大幅增加交通事故发生率,因此能见度的精确测量和预报,对环境和交通管理有着巨大的意义。

大气能见度的测量有目测法和器测法,目测法规范性、客观性相对较差<sup>[1]</sup>,而大气透射仪、散射式能见度仪等测量仪器普遍存在成本高、需定时维护、稳定性受环境限制等问题<sup>[2]</sup>。1949年,Steffens<sup>[3]</sup>提出利用图像的视觉特征来测量能见度,但受当时技术水平的限制,该方法未得到实际应用;1998年,Bush等<sup>[4]</sup>利用小

**收稿日期:** 2016-01-05; **收到修改稿日期:** 2016-01-19; **网络出版日期:** 2016-05-20

**基金项目:** 陕西省自然科学基金(2014JM7273)

**作者简介:** 赵瑞(1990-),女,硕士研究生,主要从事信号与图像处理方面的研究。

E-mail: zhaorui\_349397116@qq.com

**导师简介:** 胡辽林(1968-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事传感技术与信号处理方面的研究。

E-mail: huliaolin@163.com(通信联系人)

波变换对截取的公路图像中对比度大于 5% 的边缘进行检测, 以此估算大气能见度, 但适用场景有限, 算法复杂; 同年, Kwon<sup>[5]</sup> 提出通过寻找目标物的亮度特征点求取能见度, 但该方法需要额外设定目标物, 成本高, 操作繁琐; 2004 年, Kwon 等<sup>[6]</sup> 又提出了一种基于摄像机的自动检测系统, 通过判断图像上处于不同距离的目标物是否可见来估算能见度, 但其精度直接受限于目标物的疏密程度。在国内吕伟涛等<sup>[7]</sup> 使用双亮度差法对日间能见度进行了大量的实验并验证了测量结果的有效性, 但该方法需人工标记且对观测条件要求高; 陈钊正等<sup>[8-10]</sup> 使用自标定、小波变换、云台镜头 (PTZ) 等方法, 通过公路监测视频进行能见度检测, 效果好, 但测量距离有限, 且在道路结冰的情况下无法正常检测。

2011 年, He<sup>[11]</sup> 提出了暗原色先验理论, 该理论被证明是目前最有效的图像去雾方法。本文提出将暗原色先验理论用于能见度测量, 通过图像获得目标物到摄像点的透射率, 再根据透射率求出大气消光系数, 从而求得大气能见度值, 经大量实验验证, 利用暗原色先验理论测量的能见度值符合能见度观测的应用要求, 且具有成本低, 操作方便, 无需额外标定, 稳定性好的优点。

## 2 能见度测量原理

以天空为背景, 水平观测自身亮度为  $L_0$  的目标物时, 物体视亮度  $L$  与观测距离  $d$  的关系可以表示为<sup>[12]</sup>

$$L = L_0 \exp(-\beta d) + L_f [1 - \exp(-\beta d)], \quad (1)$$

式中  $\beta$  为大气消光系数,  $L_f$  为大气光亮度。

根据(1)式, 可推导出基于大气亮度的对比度衰减规律为<sup>[13]</sup>

$$C = C_0 \exp(-\beta d), \quad (2)$$

式中  $C$  为目标物在  $d$  处的固有视亮度对比,  $C_0$  为目标物相对于背景的固有亮度对比<sup>[14]</sup>。观测距离  $d$  逐渐增大时,  $C$  逐渐减小, 目标物逐渐模糊, 在  $C$  减小到某一临界值时, 人眼将无法把目标物从背景中分辨出来, 这一临界值称为对比感阈  $\epsilon$ 。由此可见,  $C = \epsilon$  是目标物由能见转化为不能见的条件<sup>[15]</sup>。

标准大气能见度 (SV) 定义为对比感阈  $\epsilon$  取 0.02 时能识别白背景上的理想暗物体的距离。而在航空气象部门, 为了保证飞行的安全, 建议采用气象光学视程 (MOR) (对比感阈  $\epsilon = 0.05$ ) 作为能见度的特征量, 这时能见度  $V$  与大气消光系数  $\beta$  之间的关系为<sup>[16]</sup>

$$V = -\frac{1}{\beta} \ln 0.05 \approx \frac{3}{\beta}, \quad (3)$$

于是, 可通过测量大气消光系数来测量能见度。

## 3 基于暗原色先验理论的能见度测量

### 3.1 暗原色先验理论

在计算机视觉与数字图像处理中, 雾霾图像物理模型可以表示为<sup>[17]</sup>

$$I(x) = J(x)t(x) + A [1 - t(x)], \quad (4)$$

式中  $x$  表示目标物的平面坐标,  $I(x)$  为观测到的雾霾图像值,  $J(x)$  为原无雾霾图像值,  $t(x)$  为传输透射率,  $A$  为大气光强度。

假设大气光是均匀分布的, 传输透射率可以表示为

$$t(x) = \exp[-\alpha d(x)], \quad (5)$$

式中  $\alpha$  是大气散射系数,  $d(x)$  是目标物到摄像头的距离。在可见和红外波段, 大气对光的吸收作用可忽略不计<sup>[18]</sup>, 因此, 消光系数近似等于散射系数, 即  $\beta \approx \alpha$ 。

在计算时, 对雾霾图像进行分窗口处理, 假设每一个窗口内透射率  $t(x)$  为常数, 记作  $\tilde{t}(x)$ , 对(4)式两边求两次最小值得

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c} \right] = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(y)}{A^c} \right] + 1 - \tilde{t}(x), \quad (6)$$

式中  $c$  表示原无雾霾图像的 RGB 颜色通道中的一个通道,  $r, g, b$  表示图像中 RGB 三个颜色通道,  $\Omega(x)$  表示以像素  $x$  为中心的一个窗口。暗原色理论认为在绝大多数非天空区域里, 一些像素至少有一个颜色通道

具有很低的值。对任意的输入原无雾霾图像,有  $J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} [\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y)] = 0$ 。由此可知

$\min_{y \in \Omega(x)} \left[ \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(y)}{A^c} \right] = 0$ , 将其代入(6)式,可求得透射率为  $\tilde{t}(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\}$ 。而在现实

生活中,即使是晴朗的天气,空气中也存在着大气颗粒,雾霾的存在让人感受到景深的存在,因此,观测到的图像需要引入一个固有的去雾参数  $\mu$  ( $0 < \mu < 1$ , 一般取  $\mu = 0.95$ ), 此时透射率可以表示为

$$\tilde{t}(x) = 1 - \mu \min_{c \in \{r, g, b\}} \left\{ \min_{y \in \Omega(x)} \left[ \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \right\} \quad (7)$$

但经过大量实验发现,若不考虑天气情况,选取固定大小的  $\mu$  值,会出现较大误差。表 1 是能见度分别为 10336 m 和 1353 m,透射率为分别为 0.8904 和 0.5873 时,在不同去雾系数  $\mu$  下所测的透射率值与误差。根据表 1 可以看出,去雾系数对透射率估计有很大的影响,直接影响透射率估计的准确度。在天气晴朗,能见度值大于 10 km 时,取  $\mu = 0.7 \sim 0.75$ ; 当大气颗粒物浓度较大,能见度值小于 2000 m 时,去雾参数  $\mu = 0.85 \sim 0.9$ 。

表 1 能见度为 10336 m 和 1353 m 时不同去雾系数所测透射率值与误差

Table 1 Transmittance and errors in different parameters  $\mu$  when the visibility is 10336 m and 1353 m

Visibility of 10336 m			Visibility of 1353 m		
$\mu$	Transmittance	Error/%	$\mu$	Transmittance	Error/%
0.7	0.8959	0.6	0.7	0.6607	28.4
0.75	0.8879	-5.6	0.75	0.6365	17.8
0.8	0.8486	-29.3	0.8	0.6123	8.5
0.85	0.8385	-34.1	0.85	0.5881	0.2
0.9	0.8284	-38.3	0.9	0.5639	-7.1
0.95	0.8183	-42.1	0.95	0.5357	-13.7

在实际计算中,整体大气光  $A$  的估计可通过雾霾图像来获取,首先选取暗通道中亮度最大的 0.1% 个像素(这些像素都是不透明的),然后在原雾霾图像中寻找相应位置上亮度最大的值,将其作为整体大气光  $A$  的值。

### 3.2 目标区域的选取

目标区域的选取直接关系到对整体透射率估计的精确度,对准确计算大气能见度有至关重要的意义。实验在两种场景下采集了大量的图像。如图 1 所示,场景一拍摄于西安理工大学金花校区理工大厦顶楼,场景二拍摄于西安理工大学金花校区教一楼二楼。

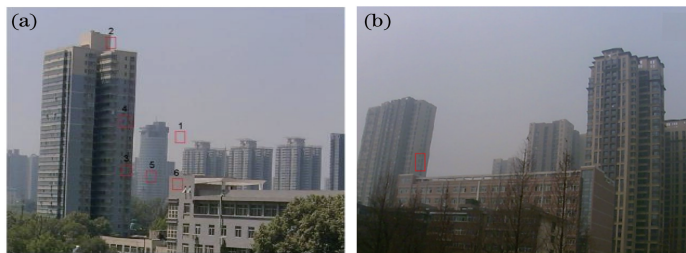


图 1 (a) 场景一拍摄的图像; (b) 场景二拍摄的图像

Fig. 1 (a) Image of scene one; (b) image of scene two

针对要处理的图像,对场景一的 6 个不同区域的 RGB 通道进行亮度分析,如图 2 所示,图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别为场景一中标记的 6 个区域的 RGB 直方图统计。区域 1 和 2 都包括天空或者接近天空颜色,区域 6 颜色较浅,对光有较强的反射作用。从图 2(a)、(b)、(f)可以看出,这 3 个区域的 RGB 通道亮度都比较大,不符合暗原色先验的条件。区域 3、4、5 颜色则比较深,可近似看成黑体。从图 2(c)、(d)、(e)可以看出,这 3 个区域的 3 个通道亮度值都比较小,而由于雾霾的存在,其亮度值不可能绝对等于 0,但都可近似满足暗原色先验理论的条件。大气能见度的测量一般是指水平能见度的测量,对斜视能见度和铅直能见度还未有很好的测量方法,测量目标物的视角以  $0.5^\circ \sim 5^\circ$  为宜,越接近水平方向越好。所以,在选取目标

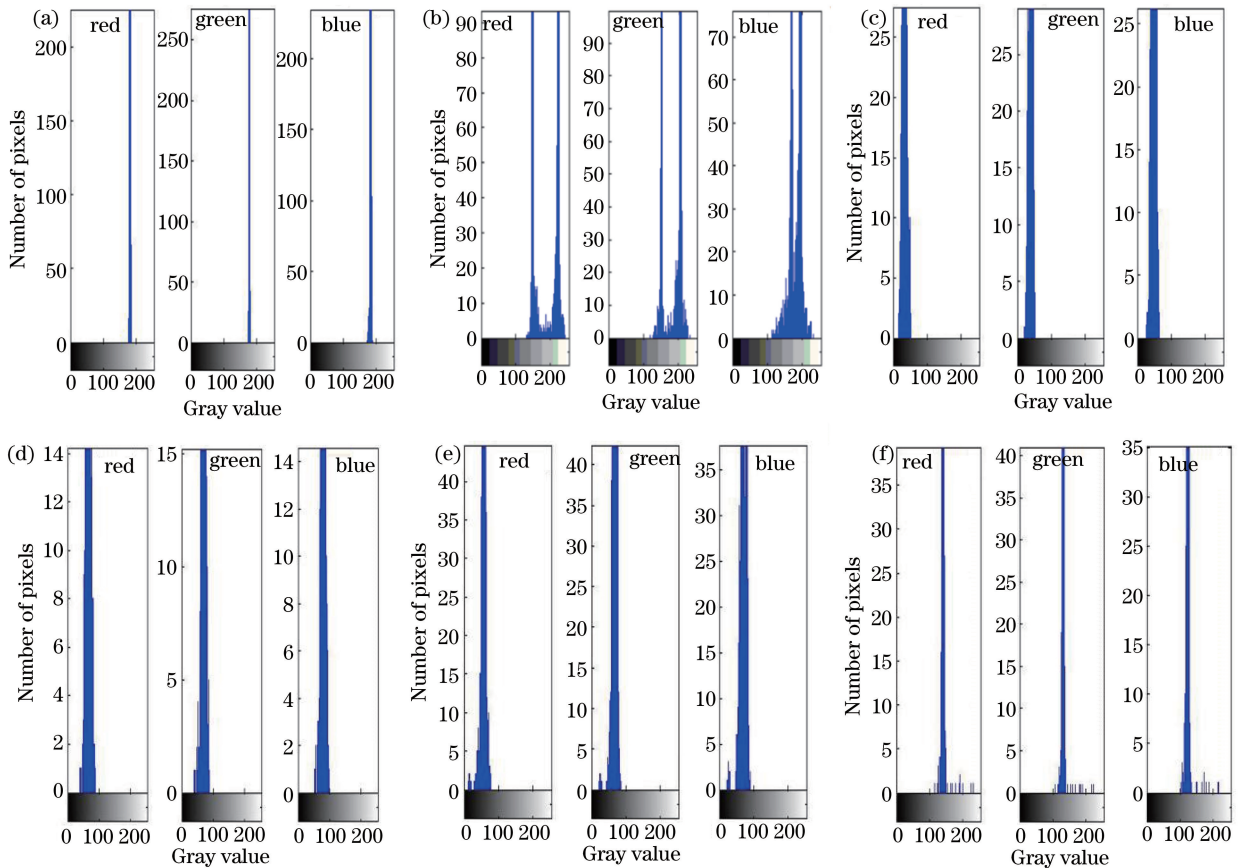


图2 不同区域的RGB通道直方图。(a) 区域1; (b) 区域2; (c) 区域3; (d) 区域4; (e) 区域5; (f) 区域6

Fig. 2 RGB histogram of different areas. (a) Area 1; (b) area 2; (c) area 3; (d) area 4; (e) area 5; (f) area 6

区域时,要尽量选择与拍摄角度水平的区域,区域4仰角较大,不宜选作目标区域。

选择目标区域时除了要考虑亮度信息对透射率估计的影响,还应考虑目标区域到摄像头的距离的影响。本实验在目标区域与摄像头距离小于50 m或者大于1000 m时,透射率估计会出现差错。区域5距离摄像位置1400 m,在雾霾较大的天气条件下会有错误的透射率估计,也不宜作为目标区域。所以,目标区域选取要满足两个条件:

1) 目标物颜色较深或者与天空颜色相差较大,因为深色的物体意味着存在一个颜色通道的亮度值非常低,符合暗原色先验的条件;还需避免明亮的或者强光照射的区域,因为这些区域整体接近于白色,通道的值差异不大,接近大气光,所以在该区域会得到透射率的错误估计。

2) 目标物离摄像头的距离  $50 \text{ m} \leq d \leq 1000 \text{ m}$ 。当目标区域到摄像头的距离不在这个范围内时,由天气状况引起的不确定度增大,会使测得的大气透射率出现差错。

### 3.3 透射率的求取与优化

在求取透射率时,假设每个窗口内透射率  $t(x)$  为常数,但这样求得的透射率较为粗糙,丢失了边缘信息,误差较大。可采用引导滤波对透射率进行平滑与细化<sup>[19]</sup>,引导滤波是一种边缘保留平滑算子,认为某函数上一点与其邻近部分的点呈局部线性关系。滤波过程中包含引导图像  $W$ 、输入图像  $p$  以及输出图像  $q$ ,引导图像  $W$  既可以是待滤波的图像本身,也可以是其他图像,但输入图像  $p$  只能是待滤波图像。假设引导图像与输出图像在一个二维窗口内满足线性关系:

$$q_i = a_k W_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (8)$$

式中  $q_i$  是输出像素的值,  $W_i$  是输入引导图像的值,  $i$  和  $k$  是像素索引,  $a_k$  和  $b_k$  是当窗口的中心位于  $k$  时该线性函数的系数,  $\omega_k$  是以  $k$  为中心的窗口。

为使输出图像  $q$  与输入图像  $p$  的差别最小,于是有



$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in O_k} [(a_k W_i + b_k - p_i)^2 + \kappa a_k^2], \quad (9)$$

式中  $p_i$  是输入图像值, 系数  $\kappa$  是调节滤波器滤波效果的重要参数, 用于防止求得的  $a_k$  过大。当像素位于平滑区域中心时, 其大小用临近像素的平均值代替; 当位于高方差区域中心时, 其大小保持不变。 $\kappa$  的作用就是界定平滑区域 ( $\sigma^2 < \kappa$ ) 与高方差区域 ( $\sigma^2 > \kappa$ )。

由于每个像素都由多个线性函数所描述, 因此求某一点的输出值时, 只需将所有包含该点的线性函数值平均即可, 即

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k: i \in \omega_k} (a_k W_i + b_k) = \bar{a}_i W_i + \bar{b}_i, \quad (10)$$

式中的待定系数  $a_k$  和  $b_k$  利用线性回归和最小二乘法求取。

对不同场景采集的图像进行透射率估计并使用引导滤波优化, 如图 3 和图 4 所示, 可以看出, 优化后的透射率估计图更为精细, 景物的细节轮廓更加明显, 较好地保留了边缘信息。

用  $t_B$  和  $t_A$  分别表示优化前后透射率的大小, 把根据 CJY-1G 所测能见度值反演的透射率作为真值, 优化前后的透射率相对误差分别用  $\delta_{t_B}$  和  $\delta_{t_A}$  表示, 结果如表 3 所示。可以看出优化前透射率的相对误差较大, 而优化后的透射率相对误差明显减小。

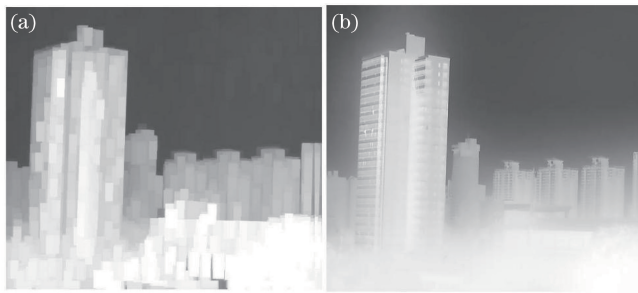


图 3 (a) 场景一的优化前透射率估计图; (b) 场景一的优化后透射率估计图

Fig. 3 (a) Estimated transmittance map before guided filtering of scene one;

(b) refined transmittance map after guided filtering of scene one

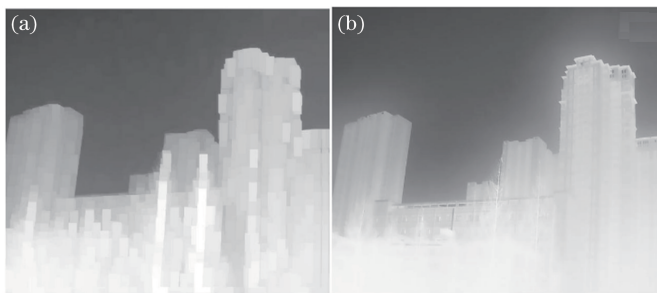


图 4 (a) 场景二的优化前透射率估计图; (b) 场景二的优化后透射率估计图

Fig. 4 (a) Estimated transmittance map before guided filtering of scene two;

(b) refined transmittance map after guided filtering of scene two

表 3 优化前后透射率相对误差

Table 3 Relative errors of transmittance before and after guided filtering

$t$	$t_B$	$\delta_{t_B} / \%$	$t_A$	$\delta_{t_A} / \%$
0.8090	0.7698	-4.8	0.8082	-0.09
0.5873	0.5319	-9.4	0.5915	0.7
0.6526	0.6341	-2.8	0.6535	0.13
0.9019	0.8570	-5.0	0.9059	0.4
0.7451	0.7212	-3.2	0.7599	2.0

## 4 实验与分析

对图 1 两种场景的不同室外条件、不同时间段的雾霾图像进行能见度观测实验,并将实验结果与安装在西安理工大学金花校区教六楼顶的 CJY-1G 型前向散射能见度仪的测量数据进行比较。

对图(1)中的场景一,从 2015 年 4 月 25 日到 2015 年 5 月 2 日,每天早上 8 点到下午 6 点,隔半小时进行一次图像采集,选取图中标记的区域 3 为目标区域,目标区域到拍摄点的距离为 400 m,对其进行透射率估计并进行优化,将优化后的透射率  $t$  代入(5)式,求得大气散射系数  $\alpha$ ,由此得到大气消光系数  $\beta$ ,再代入(3)式求得大气能见度  $V$ 。图 5 是 2015 年 4 月 27 日与 2015 年 4 月 28 日的能见度监测结果对比图,可以看出,使用暗原色理论计算得到的大气能见度值与前向散射仪 CJY-1G 测得的数据基本保持一致。由能见度的变化趋势可以看出西安市碑林区一天的能见度变化情况,早上 8 点到 9 点是上班高峰期,汽车尾气等污染气体排放量较大,大气颗粒物浓度增大,使得大气消光系数增大,能见度随之减小;到中午,随着光照的增强,天空亮度逐渐均匀,能见度观测范围逐渐增加;下午 5 点,随着下班高峰期的到来以及光照强度的减弱,能见度观测范围逐渐减小。

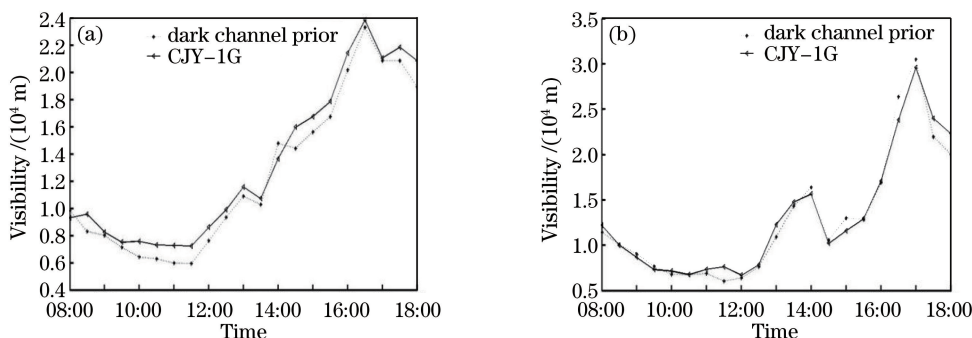


图 5 不同时间场景一的暗原色先验算法与 CJY-1G 能见度监测对比。(a) 2015 年 4 月 27 日; (b) 2015 年 4 月 28 日  
Fig. 5 Visibility comparison based on dark channel prior and CJY-1G of scene one on different time.

(a) April 27th, 2015; (b) April 28th, 2015

对图 1 中的场景二从 2014 年 10 月 1 日到 2015 年 1 月 1 日的每天下午 4 点进行连续 3 个月的图像采集,进行能见度测量,其能见度监测结果对比如图 6 所示,将 2 组数据进行最小二乘拟合,拟合结果如图 7 所示,拟合关系式为  $y' = 1.0056x' - 246.3168$ ,单位是 m,二者的相关系数  $R$  近似等于 1。利用暗原色先验原理的能见度检测结果,以前向散射仪数据作为真值,测量值最小误差为 0.07%,最大相对误差为 20.3%,93.5%的点落在  $\pm 15\%$  的区域内。前向散射仪 CJY-1G 的精度要求当能见度小于等于 1500 m 时,误差允许范围为  $\pm 10\%$ ;当能见度大于等于 1500 m 时,误差允许范围为  $\pm 20\%$ 。根据世界气象组织规定,在全部探测范围内,能见度仪的相对误差小于等于  $\pm 20\%$  便可达到标准,可投入使用。以上所用方法检测的能见度值完全满足规定误差范围,符合能见度观测的应用要求。

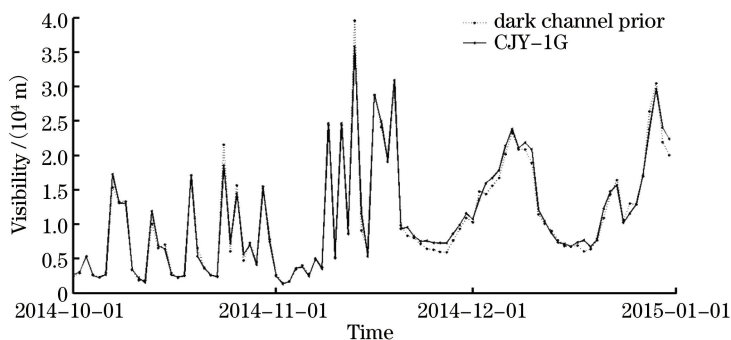


图 6 不同时间场景二的暗原色先验算法与 CJY-1G 能见度监测对比

Fig. 6 Visibility comparison based on dark channel prior and CJY-1G of scene two on different time

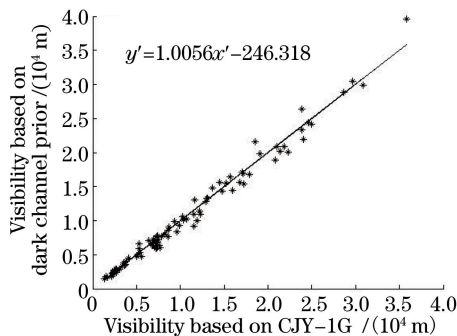


图7 能见度测量结果拟合曲线

Fig. 7 Visibility measurement results fitting curves

## 5 结 论

利用图像的暗原色先验理论对大气能见度进行测量,通过处理拍摄的雾霾图像获得大气透射率并对其进行优化,再根据透射率求出大气消光系数,从而求得大气能见度值。将测量结果与前向散射仪 CJY-1G 测量的数据进行比较,在能见度范围为 500 m~50 km 时,本方法表现良好,相对误差小于  $\pm 15\%$ ,但在能见度小于 500 m 时,测量结果误差较大,有待于进一步改进。基于暗原色先验理论的能见度测量方法操作简单,成本低,不受天气状况的影响,稳定性好,可用于多种场合的能见度测量。但本文采集的图像大小为 480 pixel $\times$ 640 pixel,分辨率为 96 dpi $\times$ 96 dpi(dpi 表示每英寸长度内的点数),未考虑图像质量对测量结果的影响,在选取目标区域时需根据经验人工手动选取,下一步研究主要集中于目标区域的自动识别、算法的优化以及图像质量对本方法的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Lü Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, *et al.*. A new mirco-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908005.  
吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 新型微脉冲激光雷达测量大气水平能见度[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908005.
- 2 Yin Shuxian, Luo Kun, Mo Weiqiang. Analysis of visibility data obtained by the artificial observation and the instrumental survey[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2009, 9(3): 66-69.  
尹淑娴, 罗 鹏, 莫伟强. 人工目测与仪器测量的能见度数据资料分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2009, 9(3): 66-69.
- 3 Steffens C. Measurement of visibility by photographic photometry[J]. Industrial Engineering Chemistry, 1949, 41(11): 2396-2399.
- 4 Bush C, Dedes C. Wavelet transform for analyzing fog visibility[J]. IEEE Intelligent Systems, 1998, 13(6): 66-71.
- 5 Kwon T M. An automatic visibility measurement system based on video cameras[R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation Duluth Office and Office of Research Administration, 1998.
- 6 Kwon T M. Atmospheric visibility measurements using video cameras: Relative visibility[R]. Minnesota: Minnesota Department of Transportation Duluth Office and Office of Research Administration, 2004.
- 7 Lü Weitao, Tao Shanchang, Liu Yifeng, *et al.*. Measuring meteorological visibility based on digital photography: Dual differential luminance method and experimental study[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2004, 28(4): 559-570.  
吕伟涛, 陶善昌, 刘亦风, 等. 基于数字摄像技术测量气象能见度: 双亮度差方法和试验研究[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 559-570.
- 8 Chen Zhaozheng, Chen Qimei. Video contrast visibility detection algorithm and its implementation based on camera self-calibration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2907-2912.  
陈钊正, 陈启美. 基于摄像机自标定的视频对比度能见度检测算法与实现[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2907-2912.
- 9 Chen Zhaozheng, Zhou Qingkui, Chen Qimei. Video visibility detection algorithm based on wavelet transformation[J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 92-98.
- 陈钊正, 周庆逵, 陈启美. 基于小波变换的视频能见度检测算法研究与实现[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 92-98.
- 10 Zhang Xiao, Li Bo, Chen Qimei. PTZ visibility detection algorithm based on luminance characteristic and its implementation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(2): 381-387.
- 张 潇, 李 勃, 陈启美. 基于亮度特征的PTZ视频能见度检测算法及实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 381-387.
- 11 He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- 12 Xu Xi, Yin Xucheng, Li Yan, *et al.*. Visibility measurement with image understanding[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2013, 26(6): 543-551.
- 许 茜, 殷绪成, 李岩, 等. 基于图像理解的能见度测量方法[J]. 模式识别与人工智能, 2013, 26(6): 543-551.
- 13 Guo Shangshu, Qi Wenxin, Qi Yu. Video visibility measurement method based on dark channel prior[J]. Computer and Digital Engineering, 2014, 42(4): 694-697.
- 郭尚书, 齐文新, 齐 宇. 基于暗通道先验的视频能见度测量方法[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(4): 694-697.
- 14 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2486-2492.
- 饶瑞中. 大气中的视觉与大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2486-2492.
- 15 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. Atmospheric physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003: 448-455.
- 盛培轩, 毛节奏, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 448-455.
- 16 Zhang Jingwei, Wu Pengfei, Rao Ruizhong. Infrared atmospheric visibility: Definition, algorithm and analysis of key factors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1101002.
- 张景伟, 武鹏飞, 饶瑞中. 红外大气能见度: 定义、算法及关键因素分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1101002.
- 17 Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- 18 Lin Yong, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan, *et al.*. Simulation research 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.
- 19 He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 35(6): 1397-1409.