

大气非均匀路径中图像退化光学模型

武鹏飞^{1,2} 徐青山¹ 方 帅³ 饶瑞中¹

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230039

摘要 均匀路径中图像退化光学模型广泛应用于大气中退化图像的复原, 而对于斜程观测情况, 视线路径中的光照和光学性质是非均匀的, 即使在水平路径中也会面临不均匀的状况。从平面平行大气辐射传输理论出发, 建立了非均匀路径中图像退化光学模型, 并在典型大气、观测条件下对模型进行了仿真分析。结果表明, 对于近水平观测, 非均匀路径退化模型简化为均匀路径中的退化模型; 当观测距离较小时, 两个模型在表达形式上是一致的, 并且相对于长波段, 短波段更满足此结论; 不同观测方向和太阳的方位角差对退化模型的影响只在于观测处背景光的不同; 此外, 退化模型依赖于近地面水平能见度。

关键词 大气光学; 图像退化模型; 非均匀路径; 辐射传输

中图分类号 P407.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0501002

Optical Model of Image Degradation in Atmospheric Inhomogeneous Path

Wu Pengfei^{1,2} Xu Qingshan¹ Fang Shuai³ Rao Ruizhong¹

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230039, China

Abstract The optical model of image degradation in homogeneous path is widely used in restoration of degraded image in atmosphere. However, when observing in slant path, the illumination and optical characteristic are inhomogeneous in the path of sight. This also occurs even though in horizontal path. The optical model of image degradation in inhomogeneous path is founded based on radiative transfer theory of the parallel plane atmosphere, and the simulation analysis on the model under typical atmospheric and observing conditions is performed. From the results, the degradation model in inhomogeneous path is reduced to the model in homogeneous path when observing near horizontally. While the observing distance is short, the two models are consistent in expression form. And compared with longer wavelengths, the conclusion is better satisfied at shorter wavelengths. The effect of different azimuthal angle differences on degradation model lies only in the difference of background skylight in the position of observer. In addition, the degradation model depends on the near-ground horizontal visibility.

Key words atmospheric optics; image degradation model; inhomogeneous path; radiative transfer

OCIS codes 010.1290; 010.7295; 330.4060; 330.4595

1 引 言

在户外成像过程中, 由于受到大气分子和气溶

胶粒子的吸收和散射, 图像对比度会受到严重影响。依据大气中图像退化的物理机制, 分析各种大气光

收稿日期: 2011-10-20; **收到修改稿日期**: 2011-12-28

基金项目: 国家 973 计划和国家自然科学基金(61175033)资助课题。

作者简介: 武鹏飞(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事大气中图像退化机理方面的研究。

E-mail: wupengfei422@126.com

导师简介: 饶瑞中(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事大气湍流和激光传输等方面的研究。E-mail: rao@aiofm.ac.cn (中国光学学会会员号: S0404207915)

学参数对成像质量的影响,建立图像退化的光学模型成为国内外研究者关注的热点。

20世纪70年代,Lutomirski^[1]利用随机介质中的光传播理论从频域的角度分析了图像在大气中的传输问题,认为大气造成图像模糊的过程是原始图像和大气调制传递函数(MTF)的卷积,并得到了混浊大气介质的MTF。20世纪90年代,Sadot等^[2~5]通过已知的时间信息、气象信息和摄像系统的参数信息等先验知识对大气MTF进行预测,并利用得到的MTF通过解卷积过程对模糊图像进行复原。然而,该方法的问题在于能否准确地预测混浊大气介质的MTF。在实际应用中,研究者将混浊大气介质的MTF按照高于和低于空间截止频率来处理^[2~5],然而混浊介质MTF理论上存在远高于和远低于空间截止频率两种情况,这种处理方法是否得当还需要进一步探讨^[6]。

在假定视线路径中照度和光学性质均相同的情况下,McCartney^[7]提出基于目标光衰减分量和天空光分量的图像退化光学模型,认为图像中每一像元的亮度值为目标固有亮度经过大气路径后的衰减分量与观察视线光路上天空散射光分量的叠加。目前,依据均匀路径中图像退化模型或其变形形式,发展出了许多图像复原方法^[8~14],并得到了较好的复原效果。然而,在斜程观测情况下,视线路径中的光照和光学性质是非均匀的,即使在水平路径中也会面临不均匀的状况。因此,对于航空摄像等更关注倾斜路径中图像对比度降低的问题,需要建立更贴合实际大气状况的图像退化数理模型,并依据该数理模型对降质图像进行复原。

本文首先简单介绍了已得到广泛应用的均匀路径中的图像退化光学模型,然后从平面平行大气辐射传输理论出发,通过求解辐射传输方程,得到了斜程非均匀路径中图像退化的光学模型,并利用大气辐射传输软件MODTRAN4.0从观测几何方位、可见光波段、近地面水平能见度等三个方面对模型进行了仿真分析,得到了典型大气、观测条件下退化模型的特征。

2 均匀路径图像退化光学模型

水平均匀路径中图像退化光学模型^[7]目前已得到广泛应用。成像装置接收到的亮度主要由两部分组成,分别为目标固有亮度经过大气路径后的衰减分量以及视线路径中的天空散射光分量,数学描述为

$$I_{\text{vis}}(\tau) = I_{\text{obj}}(\tau)T_{\text{h}}(\tau) + I_{\text{back_vis}}(\tau)[1 - T_{\text{h}}(\tau)], \quad (1)$$

式中 τ 为由大气上界向下测量的垂直光学厚度, $I_{\text{vis}}(\tau)$ 为成像装置接收到的亮度, $I_{\text{obj}}(\tau)$ 为目标固有亮度, $I_{\text{back_vis}}(\tau)$ 为水平方向无穷远处的天空背景光, $T_{\text{h}} = -\int_0^L \beta_{\text{ext}} dl = \exp(-\beta_{\text{ext}}L)$ 为水平均匀路径的大气透射率, β_{ext} 为消光系数, L 为成像距离。

3 非均匀路径图像退化光学模型

平面平行大气中辐射传输方程的一般表达式如下^[15]:

$$\mu \frac{dI(\tau, \theta, \phi)}{d\tau} = I(\tau, \theta, \phi) - J(\tau, \theta, \phi), \quad (2)$$

式中 I 为辐射亮度, J 为源函数, θ 为天顶角, μ 为天顶角余弦, ϕ 为方位角。

当从高度为 τ_0 的位置向上观察高度为 τ 的物体时,通过求解辐射传输方程,可以得到观察处目标的亮度和大气背景亮度的形式解^[16],分别如下:

$$I_{\text{vis}}(\tau_0) = I_{\text{obj}}(\tau)T_{\text{s}}(\tau, \tau_0) + I_{\text{path}}(\tau, \tau_0), \quad (3)$$

$$I_{\text{back_vis}}(\tau_0) = I_{\text{back_obj}}(\tau)T_{\text{s}}(\tau, \tau_0) + I_{\text{path}}(\tau, \tau_0), \quad (4)$$

式中 $I_{\text{path}}(\tau, \tau_0) = \int_{\tau}^{\tau_0} J(\tau') \exp[-(\tau_0 - \tau')/\mu] d\tau' / \mu$ 。

为了表示方便,(3),(4)式中表示辐亮度方向的变量 θ 和 φ 省略未写。 $I_{\text{obj}}(\tau)$ 为目标固有亮度, $I_{\text{back_obj}}(\tau)$ 为目标处的大气背景亮度, $I_{\text{path}}(\tau, \tau_0)$ 为进入到成像传感器的天空散射光, $T_{\text{s}} = \exp[-(\tau_0 - \tau)/\mu]$ 为斜程非均匀路径中的大气透射率。

根据(3),(4)式可以得到:

$$I_{\text{vis}}(\tau_0) = I_{\text{obj}}(\tau)T_{\text{s}}(\tau, \tau_0) + I_{\text{back_vis}}(\tau_0) \left[1 - \frac{I_{\text{back_obj}}(\tau)}{I_{\text{back_vis}}(\tau_0)} T_{\text{s}}(\tau, \tau_0) \right]. \quad (5)$$

取 $\chi = \frac{I_{\text{back_obj}}(\tau)}{I_{\text{back_vis}}(\tau_0)}$,则(5)式变为

$$I_{\text{vis}}(\tau_0) = I_{\text{obj}}(\tau)T_{\text{s}}(\tau, \tau_0) + I_{\text{back_vis}}(\tau_0)[1 - \chi T_{\text{s}}(\tau, \tau_0)]. \quad (6)$$

同样地,当从高度为 τ 的位置向下观察高度为 τ_0 的物体时,依据上述推导过程,可以得到观察处目标的亮度为

$$I_{\text{vis}}(\tau) = I_{\text{obj}}(\tau_0)T_{\text{s}}(\tau_0, \tau) + I_{\text{back_vis}}(\tau)[1 - \chi T_{\text{s}}(\tau_0, \tau)], \quad (7)$$

式中 $\chi = \frac{I_{\text{back_obj}}(\tau_0)}{I_{\text{back_vis}}(\tau)}$ 。(6),(7)式即为斜程非均匀路径中的图像退化光学模型。

由(6),(7)式可以看出,通过定义一个比例因子 χ ,可以得到与水平均匀路径中图像退化模型[(1)式]非常相似的斜程退化模型。斜程观测中目标的亮度同样包括两部分,分别为目标固有亮度经过大气路径后的衰减分量[(6),(7)式中第一项]和视线光路上的天空散射光分量[(6),(7)式中第二项]。两个模型间的相似性便于我们将均匀和非均匀路径中图像的退化过程进行对比分析,同时还可将均匀路径中退化图像复原的方法引用到斜程非均匀路径中退化图像的复原中。

通过比较可以看出两个模型之间主要存在三个不同点:1)斜程非均匀路径中的大气透射率 T_s 不能再简单地由 $\exp(-\beta_{\text{ext}}L)$ 表示,因为此时 β_{ext} 在视线路径中是非均匀的,不能再看作一个常数;2)(6),(7)式第二项中 χT_s 为斜程透射率 T_s 乘以一个比例因子 χ ,不同于均匀路径图像退化模型中单一的均匀路径透射率项 T_h ;3)(6),(7)式第二项中的 $I_{\text{back_vis}}(\tau_0)$ 表示观测处目标倾斜方向上的大气背景亮度,如果成像场景中有多不同方向的物体,则该项对应于不同倾斜方向上的大气背景亮度值,而在均匀路径的图像退化模型中,该项为水平方向无穷远处的天空背景亮度。

利用斜程非均匀路径中的图像退化光学模型,可以得到用来进行退化图像复原的公式:

$$I_{\text{obj}} = \frac{I_{\text{vis}} - I_{\text{back_vis}}}{T_s} + \chi I_{\text{back_vis}}. \quad (8)$$

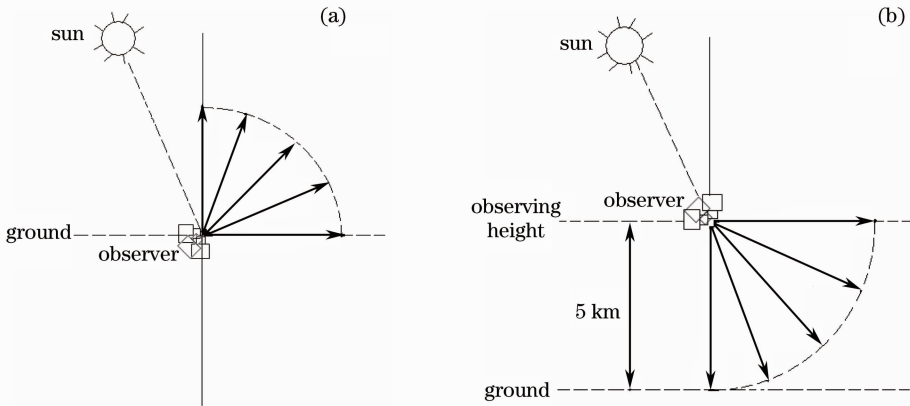


图1 仿真几何示意图。(a)向上观测;(b)向下观测

Fig. 1 Geometry of simulation. (a) Up-looking; (b) down-looking

4.1 观测几何方位的影响

图2为 $0.7 \mu\text{m}$ 波长上比例因子 χ 在不同能见度(L_{vis})条件下随观测天顶角的变化关系。具体计

(8)式不同于基于均匀路径中图像退化光学模型的复原公式:

$$I_{\text{obj}} = \frac{I_{\text{vis}} - I_{\text{back_vis}}}{T_h} + I_{\text{back_vis}}. \quad (9)$$

由(8)式可以看出,要得到目标固有亮度 I_{obj} ,需要求得的参量有:观测处目标的亮度 I_{vis} ,观测处对应于目标倾斜方向的大气背景亮度 $I_{\text{back_vis}}$;比例因子 χ ;非均匀路径透射率 T_s 。

4 非均匀路径图像退化模型的影响因素分析

在本文的仿真计算中,采用应用广泛、精度较高的大气辐射传输软件MODTRAN4.0^[17],处理多次散射采用DISORT算法^[18]。由于大气条件非常复杂,理论上仿真分析应涉及到各种大气条件及太阳和观测方位等,才能得到完善的结论,然而为了使问题不至过于复杂,本文选择典型大气、观测条件进行仿真分析,其他条件可按类似的方法进行。本文选择的参数如下:中纬度夏季大气模式,乡村型气溶胶,耕地型地表,考虑两种观测方式(如图1所示),即自地面向上观测和自5 km高度向下观测。通过探讨不同大气光学参数对比例因子 χ 、观测处大气背景亮度 $I_{\text{back_vis}}$ 和透射率 T_s 的影响来对退化模型进行分析,从而得到典型大气、观测条件下的模型特征。

算参数为:太阳天顶角 $\theta_{\text{sun}} = 30^\circ$,视线方位相对于太阳方位 $\Delta\varphi = 180^\circ$,斜程观测距离 $L = 5 \text{ km}$ 。

由图2可以看出,随着观测天顶角的增大,斜向

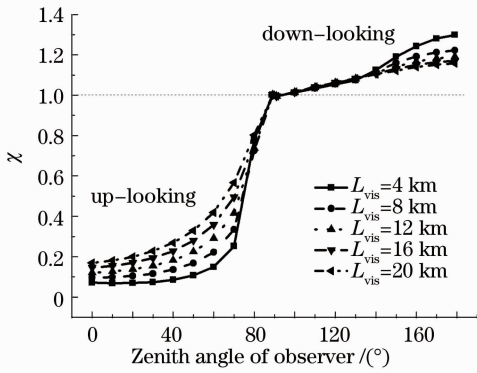


图 2 χ 与观测天顶角的关系

Fig. 2 Relation between χ and the zenith angle of observer

上观察时,目标处与观测处的天空背景亮度之间差异减小,使得比例因子 χ 逐渐增大,至水平方向变为 1;斜向下观察时,两处的天空背景亮度之间差异增大,使得 χ 由水平方向时的 1 逐渐增大。对于非近水平观测,斜向上观察时,由于观测处的天空背景亮度显著大于目标处的天空背景亮度,因此 χ 明显小于 1,且随观测天顶角明显变化;斜向下观察时,观测处的天空背景亮度略小于目标处的天空背景亮度,使得 χ 略大于 1,且随观测天顶角的变化不如斜向上观察时明显。由图中可知,在近水平方向有 $\chi \approx 1$,表明目标与观测处的天空背景亮度近似相同,即此时在平面平行大气条件假设下,视线路径的非均匀性消失,斜程退化模型简化为

$$\begin{cases} I_{\text{vis}}(\tau_0) \approx I_{\text{obj}}(\tau_0)T_h(\tau_0) + I_{\text{back_vis}}(\tau_0)[1 - T_h(\tau_0)] & \text{up-looking} \\ I_{\text{vis}}(\tau) \approx I_{\text{obj}}(\tau)T_h(\tau) + I_{\text{back_vis}}(\tau)[1 - T_h(\tau)] & \text{down-looking} \end{cases} \quad (10)$$

(10)式与水平均匀路径中的图像退化模型相同,这说明斜程退化模型既适用于非均匀路径,也适用于均匀路径,水平均匀路径中的图像退化模型可以看作斜程退化模型的一个特例,后者具有更广的应用范围。

图 3 为 $0.7 \mu\text{m}$ 波长上比例因子 χ 在不同能见度条件下随观测距离的变化关系。具体计算参数为: $\theta_{\text{zen}} = 30^\circ, \Delta\varphi = 180^\circ$,观测天顶角 $\theta_{\text{ozen}} = 60^\circ$ (向上)、 $\theta_{\text{ozen}} = 120^\circ$ (向下)。

表明与长路径相比,短路径中大气可近似看作均匀的,此时斜程退化模型可以简化为

$$I_{\text{vis}}(\tau) \approx I_{\text{obj}}(\tau_0)T_s(\tau_0, \tau) + I_{\text{back_vis}}(\tau)[1 - T_s(\tau_0, \tau)]. \quad (11)$$

(11)式与均匀路径中的图像退化模型在表达形式上是一致的,不同的是两个模型中分别是斜程和水平方向的透射率和观测处大气背景亮度。

图 4 为 $0.7 \mu\text{m}$ 波长上比例因子 χ 和观测处大气背景亮度 $I_{\text{back_vis}}$ 在不同能见度条件下随观察方向和太阳的方位角差的变化关系。具体计算参数为: $\theta_{\text{zen}} = 30^\circ, L = 5 \text{ km}, \theta_{\text{ozen}} = 60^\circ$ (向上)、 $\theta_{\text{ozen}} = 120^\circ$ (向下)。

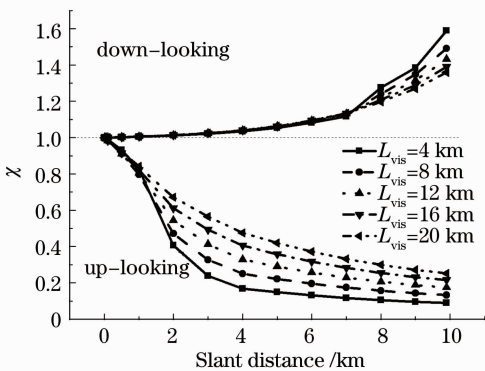


图 3 χ 与观测距离的关系

Fig. 3 Relation between χ and the slant distance

由图 3 可以看出,斜向上观察时,随着路径长度的增加,目标处与观测处的天空背景亮度之间差异增大,使得比例因子 χ 由 1 逐渐减小;斜向下观察时,同样随着路径长度的增加,两处的天空背景亮度之间差异增大, χ 由 1 逐渐增大,但变化趋势不如斜向上观察时明显。当观测距离较小时, χ 近似为 1,这

由图 4(a)可以看出,斜向上观察时,除了能见度较差($L_{\text{vis}} = 4 \text{ km}$)的情况,随着方位角差的变化,比例因子 χ 近似保持不变,可看作一个常量,这主要是因为模型基于平面平行大气条件假设,不同观测方位角下目标和观测处天空背景亮度之间的差异基本相似,此时对于斜程退化模型,由于光线经过的大气路径长度相同,透射率不变,方位角差对退化模型的影响只体现在观测处大气背景亮度的不同[如图 4(b)所示],这是因为斜向上观察时太阳的方位对不同观测方位对应的天空背景亮度会产生明显影响;斜向下观察时,随着方位角差变化, χ 和 $I_{\text{back_vis}}$ 均近似保持不变,这表明在平面平行大气条件假设下,斜向下观察时太阳方位对不同观测方位对应的天空背景亮度影响较小,同样此时由于透射率也不变,因此不同方向(相同天顶角、不同方位角)图像的退化过程是近似相同的,方位角差对退化模型基本没有影响。

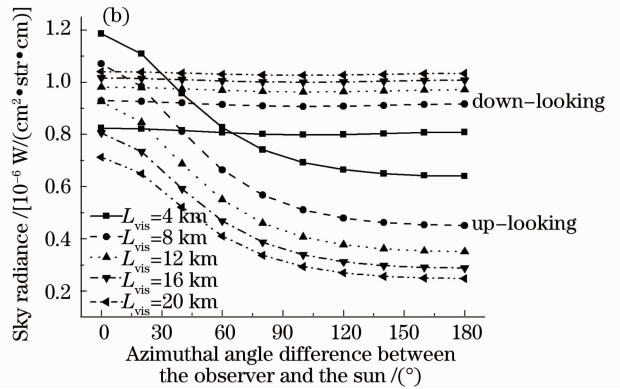
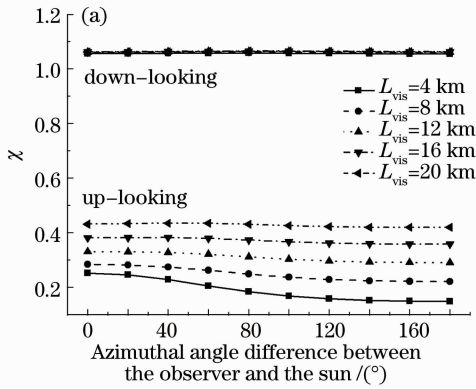

 图 4 (a) χ 和 (b) $I_{\text{back_vis}}$ 与方位角差的关系

 Fig. 4 Dependence of (a) χ and (b) $I_{\text{back_vis}}$ on the azimuthal angle difference

4.2 波长的影响

上述分析中,波长均取的是 $0.7 \mu\text{m}$,但是在实际应用中,成像装置总是工作在一定的波段范围内,因此考虑波长对退化模型的影响是非常重要的。图 5 为比例因子 χ 在不同能见度条件下随波长(可见光波段)的变化关系。具体计算参数为: $\theta_{\text{sen}} = 30^\circ$, $\Delta\varphi = 180^\circ$, $L = 5 \text{ km}$, $\theta_{\text{ozen}} = 60^\circ$ (向上)、 $\theta_{\text{ozen}} = 120^\circ$ (向下)。

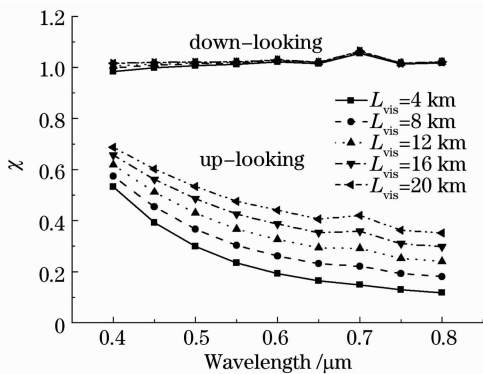

 图 5 χ 与波长的关系

 Fig. 5 Relation between χ and wavelength

由图 5 可以看出,斜向上观察时,随着波长的增加,比例因子 χ 由 1 附近逐渐减小,这主要是因为虽然长波段的大气透射率要大于短波段,然而对于短波段,多次散射的贡献较大,使得观测处和目标处的天空背景亮度之间差异更小;斜向下观察时,同样基于上述原因,使得 χ 由 1 左右逐渐增大,但变化趋势不如斜向上观察时明显。短波段与长波段相比,尤其是在向上观察时, χ 更接近 1,这说明对于短波段,斜程退化模型更满足(11)式,与均匀路径退化模型在表达形式上更一致。

4.3 水平能见度的影响

由图 2~5 可以看出,斜向上观察时,能见度越

大,比例因子 χ 越接近 1,这主要是因为当能见度增大时,目标与观察者之间的路径中大气散射光的贡献降低了,使得目标处与观测处的天空背景光之间差异减小,这说明对于能见度好的大气状况,斜程非均匀路径中图像退化模型与均匀路径退化模型在表达形式上更一致,而斜向下观察时比较复杂,没有一般的规律可循。

5 结 论

通过求解平面平行大气辐射传输方程,得到了更贴合实际大气状况的斜程非均匀路径中的图像退化光学模型,并在典型大气、观测条件下,从观测几何方位、可见光波段、近地面水平能见度等三个方面对模型进行了仿真分析。研究发现,斜程退化模型既适用于非均匀路径,也适用于均匀路径,在近水平观测情况下,斜程退化模型简化为均匀路径中的图像退化模型。当观测距离较小时,斜程退化模型与均匀路径中图像退化模型在表达形式上是一致的,不同的是两个模型中分别是斜程和水平方向的透射率和观测处大气背景亮度,同时,相比于可见光的长波段,短波段更满足此结论。不同观察方向和太阳的方位角差对应的退化过程是基本相同的,不同之处仅在于观测处的大气背景亮度。对于不同的观测方式(向上或向下),近地面水平能见度对退化模型的影响是不同的。本文对退化模型的仿真分析是在特定条件下进行的,得到的结论不具有通用性,但在典型大气、观测条件下得到的模型特征对于分析斜程大气中图像退化过程,并依据退化模型对降质图像进行复原仍具有一定的借鉴作用。对于其他大气、观测条件下的模型特征,可以沿用类似的方法进行。

斜程非均匀路径中图像退化光学模型从理论上可以很好地描述大气非均匀路径中图像的退化过程,如何将光学模型应用到大气中降质图像的复原将是以后的工作重点。

参 考 文 献

- 1 R. F. Lutomirski. Atmospheric degradation of electrooptical system performance [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17** (24): 3915~3921
- 2 D. Sadot, N. S. Kopeika. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1993, **10**(1): 172~179
- 3 N. S. Kopeika, T. Sheayik, Z. Givati *et al.*. Restoration of satellite images based on atmospheric MTF[C]. *SPIE*, 1996, **2817**: 106~117
- 4 N. S. Kopeika. Aerosol modulation transfer function: an overview[C]. *SPIE*, 1997, **3125**: 214~225
- 5 Y. Yitzhaky, I. Dror, N. S. Kopeika. Restoration of atmospherically blurred images according to weather predicted atmospheric modulation transfer functions[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(11): 3064~3072
- 6 Rao Ruizhong. General characteristics of modulation transfer function of turbid atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900125
饶瑞中. 混浊大气介质调制传递函数的一般特征[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900125
- 7 E. J. McCartney. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles[M]. New York: John Wiley and Sons, 1975
- 8 S. K. Nayar, S. G. Narasimhan. Vision in bad weather[C]. Proceedings of the IEEE ICCV, 1999, 820~827
- 9 Y. Y. Schechner, S. G. Narasimhan, S. K. Nayar. Polarization-based vision through haze[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(3): 511~525
- 10 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003
叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 999~1003
- 11 R. T. Tan. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of the IEEE CVPR, 2008, 1~8
- 12 K. He, J. Sun, X. Tang. Single image haze removal using dark channel prior [C]. Proceedings of the IEEE CVPR, 2009, 1956~1963
- 13 J. Tarel, N. Hauti. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. Proceedings of the IEEE ICCV, 2009, 2201~2208
- 14 L. Kratz, K. Nishino. Factorizing scene albedo and depth from a single foggy image[C]. Proceedings of the IEEE ICCV, 2009, 1701~1708
- 15 K. N. Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation (2nd Edition) [M]. Zhou Shijian Transl.. Beijing: Meteorology Publishing House, 2004
廖国男. 大气辐射导论(第二版) [M]. 周诗健译. 北京: 气象出版社, 2004
- 16 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2486~2492
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2486~2492
- 17 Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli. Waveband selection for space target detection and identification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 67~71
李雅男, 孙晓兵, 乔延利. 空间目标探测与识别的波段选择[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 67~71
- 18 K. Stamnes, S. C. Tsay, W. Wiscombe *et al.*. A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered medium [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **27**(12): 2502~2509

栏目编辑: 谢 婧