

天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法

郑鑫 武鹏飞 饶瑞中

Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere

Zheng Xin Wu Peng-Fei Rao Rui-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 088701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172625

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172625>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[用于热光伏系统的近场辐射光谱控制表面结构](#)

Surface structure for manipulating the near-field spectral radiative transfer of thermophotovoltaics

物理学报.2018, 67(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171531>

[沙尘大气电磁波多重散射及衰减](#)

Multiple scattering and attenuation for electromagnetic wave propagation in sand and dust atmosphere

物理学报.2016, 65(9): 094205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094205>

[Pearcey 光束簇的实验产生和光学结构研究](#)

Generation of a family of Pearcey beams and their optical structure

物理学报.2015, 64(23): 234205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234205>

[背景辐射对被动测距精度影响分析及实验研究](#)

Influence of background radiation on the precision of passive ranging

物理学报.2015, 64(3): 034216 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034216>

[温度、湿度及压强对激光在水中衰减特性的影响](#)

Influences of temperature, humidity and pressure on the attenuation characteristics of laser beam in water

物理学报.2015, 64(2): 024215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024215>

天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法*

郑鑫¹⁾²⁾ 武鹏飞^{2)†} 饶瑞中¹⁾²⁾

1) (中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 合肥 230022)

2) (中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 合肥 230031)

(2017年12月10日收到; 2018年2月8日收到修改稿)

调制传递函数 (MTF) 定量描述混浊介质对图像质量的影响, 它是混浊介质的固有光学特性, 利用等效原理可以获得 MTF 从低频到高频的完整特征. 在实际应用中, 混浊介质中的图像质量不仅取决于介质的 MTF, 还与图像的背景辐射密切相关. 本文从混浊大气中图像退化机理出发, 理论分析了空间频域中天光背景下图像质量的退化过程. 参考等效原理, 提出了一种考虑天光背景的表现 MTF, 得到了表现 MTF 与介质 MTF 和天光背景的定量关系, 从而得到了一种分析背景辐射下混浊介质中图像质量的有效便捷方法. 针对图像质量优化方法, 从空间频域的角度提出了一种评价原则.

关键词: 图像质量分析, 混浊介质, 调制传递函数, 背景辐射

PACS: 87.57.C-, 42.68.Ay, 42.30.Lr, 98.70.Vc

DOI: 10.7498/aps.67.20172625

1 引言

光学图像经过混浊大气传输到达探测器的过程中, 与大气分子和气溶胶粒子相互作用会导致图像质量下降^[1]. 较早的图像质量分析方法是从小角散射的角度对图像进行统计分析^[2], 这些方法在实际应用时存在些许缺陷, 如分析结果与人们的实际感知有差距^[3]等; 后来学者们提出在空间频域中采用调制传递函数 MTF (modulation transfer function) 描述混浊介质对成像质量的影响并得到较广泛的应用.

准确有效的混浊介质 MTF 是可靠分析混浊大气中成像质量退化的基础^[4]. 近几十年来, 众多学者基于 MTF 从空间频域对大气中成像质量进行了分析^[5-9], 但大多依据早期的小角散射近似模型及其扩展形式^[8-11], 虽然小角散射近似得到的近似模型在低频段具有较好的精度, 但在全空间频域范围的表征上却不能达到较好的效果. 混浊介质 MTF 等效原理是利用 MTF 与单位均匀各向同性

漫射光照射下介质出射辐射场之间的等效性, 不存在解析近似, 可得到全空间频域范围的 MTF, 可用于有效分析混浊大气中图像质量退化^[4,12]. 此外, 在实际应用中, 混浊大气介质中的成像质量不仅取决于介质的 MTF, 还与图像的背景辐射密切相关, 目前尚未有研究给出空间频域对该影响因素的分析和描述.

本文基于混浊大气中图像退化的光学模型, 首先从空间频域对天光背景下图像质量退化过程进行了详细分析, 然后参考 MTF 等效原理, 提出一种从空间频域完整描述天光背景下成像质量退化过程的混浊大气介质表现 MTF, 并进行了实景成像仿真. 此外, 针对提高图像质量的图像清晰化处理方法, 从空间频域的角度提出一种评价方法.

2 天光背景下的成像质量分析

目标图像经过混浊大气传输时, 会受到大气中分子和气溶胶粒子的影响, 如图 1 所示. 主要包括: 1) 分子和气溶胶的吸收和散射造成目标像元固有

* 国家自然科学基金 (批准号: 41505023) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wupengfei@aiofm.ac.cn

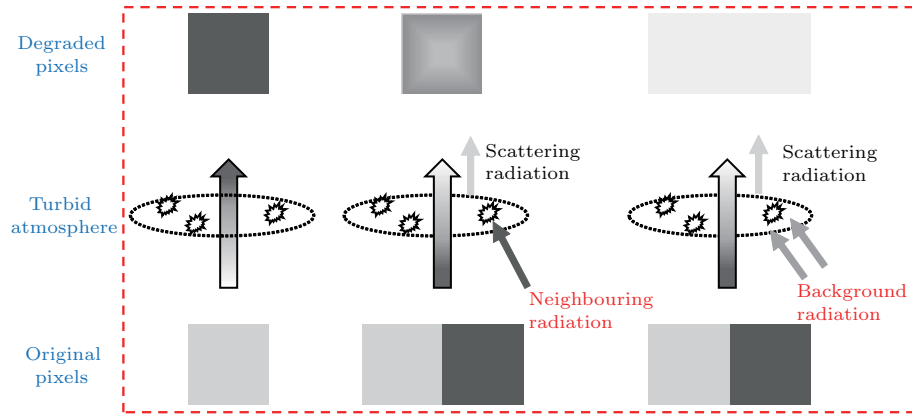


图1 目标像元混浊大气传输过程示意图

Fig. 1. Sketch map of target pixels transmission in turbid atmosphere.

亮度的衰减; 2) 邻近像元的多次散射光叠加到目标像元, 造成目标像元边缘模糊; 3) 环境光 (包括太阳直射光、大气漫射光、地表反射光等) 经过分子和气溶胶散射后的辐射叠加到目标像元和邻近像元, 造成对比度下降。

综合考虑混浊大气介质对目标图像传输的影响, 传输过程可表示为

$$I(\lambda) = I_o(\lambda) \otimes P_{SF}(\lambda) + I_p(\lambda), \quad (1)$$

其中, 第一项目标亮度 I_o 和混浊介质点扩展函数 P_{SF} 的卷积表示目标像元固有亮度衰减和邻近像元多次散射光叠加到目标像元造成的模糊, 第二项 I_p 表示叠加到目标像元和邻近像元造成对比度下降的混浊介质散射环境光, 式中 λ 表示波长。

对 (1) 式进行傅里叶变换, 得到

$$F(\Omega, \lambda) = F_o(\Omega, \lambda) \times \left[M_{TF}(\Omega, \lambda) + \frac{I_p(\lambda)}{F_o(\Omega, \lambda)} \times \delta(\Omega) \right], \quad (2)$$

其中, $F_o(\Omega, \lambda)$ 与 $I_o(\lambda)$ 互为傅里叶变换, $M_{TF}(\Omega, \lambda)$ 为调制传递函数, Ω 表示空间角频率, δ 为狄拉克函数, 有 $\delta(\Omega = 0) = 1$, $\delta(\Omega \neq 0) = 0$ 。

由 (2) 式看到, 图像空间频谱影响因素中的第一项即为混浊大气介质 MTF, 表征混浊介质衰减和多次散射的影响, 可由介质 MTF 等效原理给出全空间频域范围的 MTF。

等效原理是利用 MTF 与一种特殊漫射光照射下混浊介质出射辐射场之间存在的等效性^[4,12]。当入射光场强度 $I_0(\rho_0)$ 为单位值的均匀各向同性漫射场时, 即 $I_0(\rho_0) \equiv 1$, 像平面上的光场分布表示为

$$I(\rho) = \int P_{SF}(\rho - \rho_0) d\rho_0, \quad (3)$$

式中 ρ 和 ρ_0 为空间极坐标。

由傅里叶变换和 δ 函数的定义有

$$I(\rho) = \int O_{TF}(\nu) \exp[-2\pi i\nu(\rho_0 - \rho)] d\nu d\rho_0, \quad (4)$$

$$I(\rho) = \int I(\rho') \exp[-2\pi i\nu(\rho' - \rho)] d\nu d\rho', \quad (5)$$

式中光学传递函数 O_{TF} 是 P_{SF} 的傅里叶变换。比较 (4) 和 (5) 式, 得到

$$O_{TF}(\nu) = I(\rho'). \quad (6)$$

对于无穷远的成像问题, (6) 式空间位置 ρ' 和空间频率 ν 可以分别用无量纲的极角 θ 和空间角频率 Ω 表示。由 (6) 式可知, O_{TF} 是实数, 则 M_{TF} 表示为

$$M_{TF}(\Omega = \tan \theta) = I(\theta). \quad (7)$$

由 (2) 式可见, 图像空间频谱影响因素中的第二项为混浊大气介质散射环境光对图像零频率分量的影响, 虽然仅作用于零频率分量, 但对目标图像对比度的影响是显著的。

设目标表面反射率为 r , 对于来自目标正面半空间的均匀照明, 辐亮度为 I_1 , 则目标反射的辐亮度为^[4]

$$I_o(\lambda) = r(\lambda)I_1(\lambda). \quad (8)$$

同时, 对于均匀视线路径中的混浊大气散射光有^[13]

$$I_p(\lambda) = I_\infty(\lambda)[1 - T(\lambda)], \quad (9)$$

其中 I_∞ 为天空背景光, T 为大气透射率。

若目标没有人工照明或直射的大阳光正面照明, 而仅仅被大气中的天空背景光照明时, 则 I_1 与 I_∞ 皆为天空背景光, 在一般非特殊情况 (如接近太阳光照射方向的逆光或顺光等) 下, 二者强度相当,

即 $I_1 = I_\infty$ [4]. 那么, 混浊介质散射环境光对图像零频率分量的影响可表示为

$$\frac{I_p(\lambda)}{F_o(0, \lambda)} = \frac{1 - T(\lambda)}{kr_m(\lambda)}, \quad (10)$$

其中 r_m 表示最大表面反射率, k 是与目标零频率分量有关的参量 ($0 < k \leq 1$).

可以看出, 混浊大气介质散射环境光对图像零频率分量的影响与大气透过率、目标表面反射率及目标本身特性有关. 表 1 列出了大气透过率 T 分别为 0.1, 0.5 和 0.9, 表面反射率 r 分别为 0.1, 0.5 和 1.0, 参数 $k = 1.0$ 时, 介质散射环境光对图像零频率分量影响的定量结果. 可以看出, 随着大气透过率和表面反射率增大, 散射光对零频率分量的影响减小.

表 1 混浊大气介质散射环境光对图像零频率分量影响的定量结果

Table 1. Impact of background radiation scattered by aerosols on the zero frequency component of image.

T	r	$I_p(\lambda)/F_o(0, \lambda) (k = 1.0)$
0.1	0.1	9.0
	0.5	1.8
	1.0	0.9
0.5	0.1	5.0
	0.5	1.0
	1.0	0.5
0.9	0.1	1.0
	0.5	0.2
	1.0	0.1

为了分析介质散射环境光通过改变图像零频率分量从而对图像对比度产生的影响, 构造如图 2 所示的对比度为 0.60、调制对比度为 0.43 的格栅图, 其中对比度 C 、调制对比度 M 表示为:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (11)$$

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (12)$$

其中 I_{\min} 和 I_{\max} 分别为格栅图最小和最大光强.

将该图的零频率分量乘以一个缩放因子, 反映混浊介质散射环境光对图像的影响, 图像的对比度发生相应的变化. 图 3 给出了不同缩放因子下图像的对比度及调制对比度的变化趋势, 可以看出: 缩放因子增大, 即图像零频率分量增大, 对比度减

小; 缩放因子减小, 即图像零频率分量减小, 对比度增大.

综上所述, 混浊介质散射的环境光主要是增大图像的零频率分量, 从而导致图像质量恶化, 图像对比度降低.



图 2 对比度为 0.60、调制对比度为 0.43 的格栅图案
Fig. 2. The grille pattern with contrast of 0.60 and modulation contrast of 0.43.

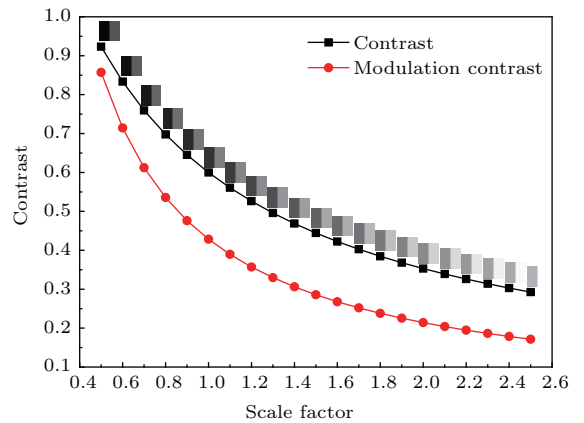


图 3 不同缩放因子下格栅图像的对比度及调制对比度的变化趋势
Fig. 3. The variation of the grille pattern contrast and modulation contrast with scale factor.

3 表观 MTF 及实景成像仿真

为了统一考虑天光背景下混浊大气介质对图像空间频谱分量的影响, 本文将介质散射环境光的影响纳入到一个整体表达中, 将其称为混浊介质表观 MTF, 记为 M'_{TF} , 用于表征实际大气中图像传输时因混浊介质而产生的综合影响. 由 (2) 式可见, M'_{TF} 表示为

$$M'_{TF}(\Omega, \lambda) = M_{TF}(\Omega, \lambda) + \frac{I_p(\lambda)}{F_o(\Omega, \lambda)} \times \delta(\Omega). \quad (13)$$

介质 M'_{TF} 综合考虑了混浊介质衰减、多次散射和散射环境光的影响, 完整描述了天光背景下目

标图像经过大气传输时混浊介质对图像空间频谱分量的影响.

为了直观地表现混浊介质 M'_{TF} 对图像质量的影响, 构造初始对比度、调制对比度均为 1.0 的目标格栅图(如图 4), 目标元的最大表面反射率为 1.0, 最小为 0, 则 $k \approx 0.33$. 介质的散射相函数选用 Henyey-Greenstein 相函数^[14], 函数中非对称因子决定了散射的角度分布形式, 仿真中非对称因子 g 取 0.7, 单次散射反照率 ω 取 1.0, 光学厚度 τ 从 0.1 变化到 1.5. 图 5(a) 和图 5(b) 为混浊介质 M_{TF} 对成像质量的影响, 图 5(c) 为不同光学厚度下的混浊介质 M_{TF} 曲线; 图 6(a) 和图 6(b) 为考虑混浊介质散射环境光影响的 M'_{TF} 对成像质量的影响. 由图 6(c) 和图 6(d) 可以看出, 考虑介质散射光的

M'_{TF} 的零频率分量大于介质 M_{TF} 的零频率分量, 前者随着光学厚度的增大而增大, 后者随着光学厚度的增大而减小.



图 4 对比度和调制对比度均为 1 的格栅图
Fig. 4. The grille pattern with contrast of 1.0 and modulation contrast of 1.0.

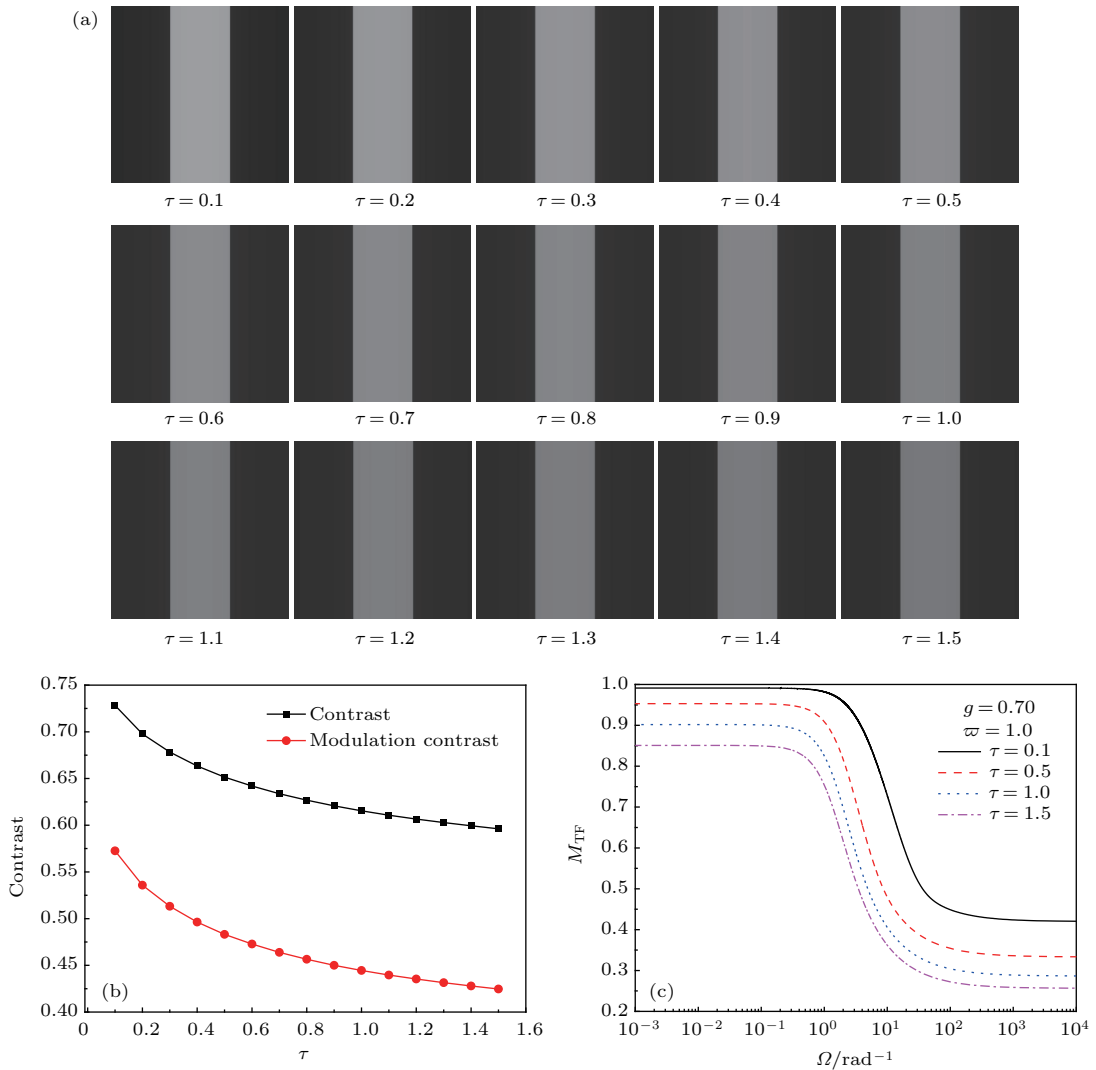


图 5 不同光学厚度下考虑介质 M_{TF} 的 (a) 成像仿真结果, (b) 对比度变化, (c) M_{TF} 曲线
Fig. 5. The effect of τ on (a) image transmission, (b) the image contrast, (c) M_{TF} curves when turbid M_{TF} is considered.

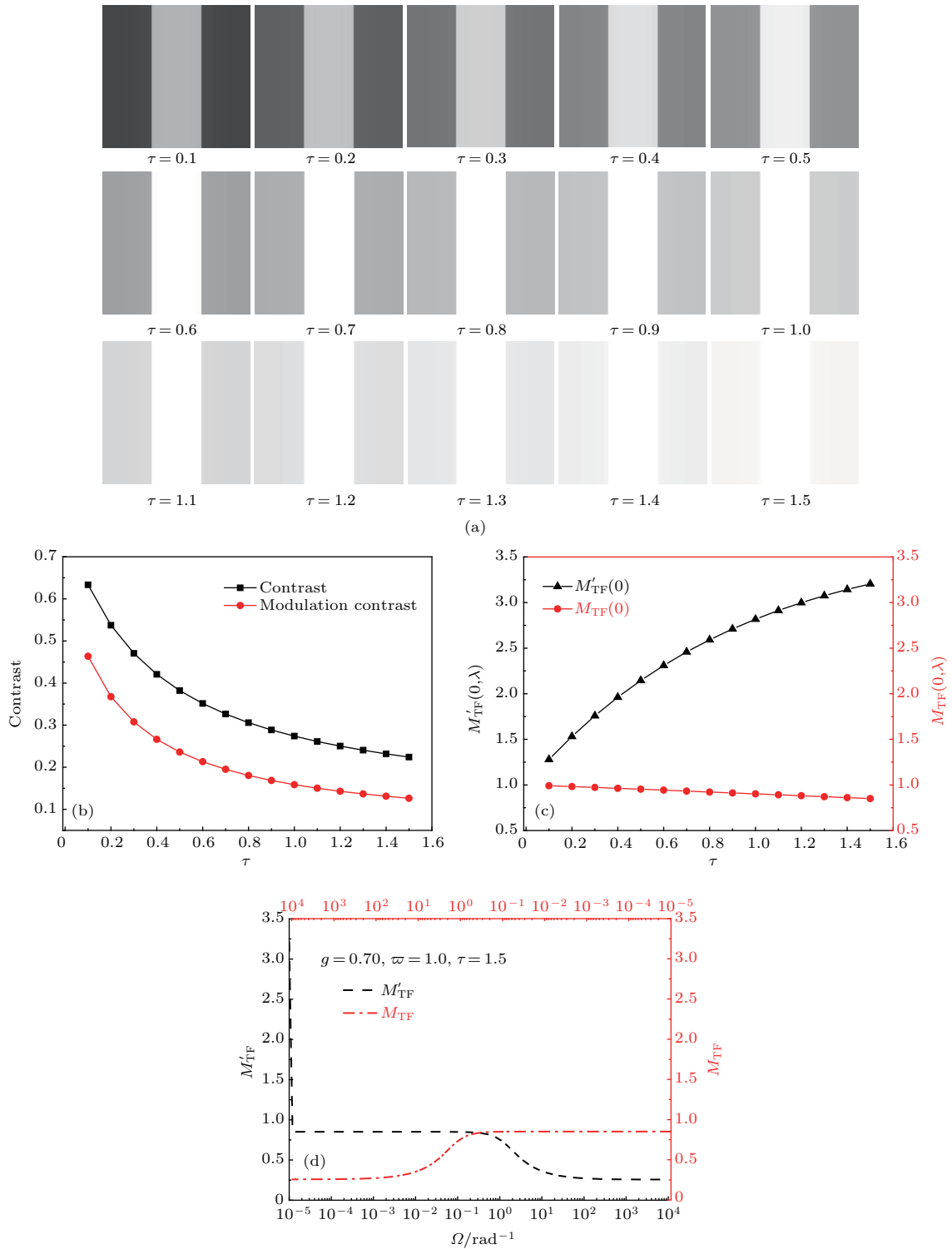


图6 不同光学厚度下考虑介质 M'_{TF} 的 (a) 成像仿真结果, (b) 对比度变化, (c) 零频分量, (d) M_{TF} 与 M'_{TF} 对比曲线
 Fig. 6. The effect of τ on (a) image transmission, (b) the image contrast, (c) zero frequency component when M'_{TF} is considered, (d) M_{TF} and M'_{TF} curves.

此外, 对不同的实际场景进行了混浊大气图像传输仿真, 观察 M'_{TF} 对图像质量影响的模拟效果. 为便于分析, 取图像中最大亮度值作为天光背景, 从而介质散射环境光对图像零频率分量的影响可

表示为

$$\frac{I_p(\lambda)}{F_o(\Omega, \lambda)} \times \delta(\Omega) = \frac{\max\{I_o(\lambda)\} \times (1 - T(\lambda))}{F_o(0, \lambda)}. \quad (14)$$

图7给出了两种实际场景下仅考虑气溶胶衰减和多次散射影响以及同时考虑气溶胶散射环境光影响的成像效果. 模拟仿真条件是: 图7(a)中光学厚度 τ 取0.30, 非对称因子 g 取0.9, 单次散射反照率 ϖ 取0.95; 图7(b)中光学厚度 τ 取0.35, 非对

称因子 g 取0.65, 单次散射反照率 ϖ 取0.9. 图像的平均亮度为

$$\bar{I} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I(i, j), \quad (15)$$

其中 M, N 分别为图像的行和列像素个数.



图7 实际场景仿真 原场景图(左); M_{TF} 影响的场景图(中); M'_{TF} 影响的场景图(右); (a) $\tau = 0.30, g = 0.9, \bar{\varpi} = 0.95$; (b) $\tau = 0.35, g = 0.65, \bar{\varpi} = 0.90$

Fig. 7. Actual scene transmission under different τ, ϖ and g : original scene (left); scene degraded by aerosol M_{TF} (middle); scene degraded by M'_{TF} (right); (a) $\tau = 0.30, g = 0.9, \bar{\varpi} = 0.95$; (b) $\tau = 0.35, g = 0.65, \bar{\varpi} = 0.90$.

表2 传统方法对图像质量定量评价
Table 2. Image quality assessed by traditional method.

	图7(a)			图7(b)		
	原场景	M_{TF} 影响场景	M'_{TF} 影响场景	原场景	M_{TF} 影响场景	M'_{TF} 影响场景
\bar{I}	148.8	136.9	197.6	71.7	69.0	104.2
$\nabla \bar{g}$	0.0054	0.0021	0.0020	0.0043	0.001243	0.001244

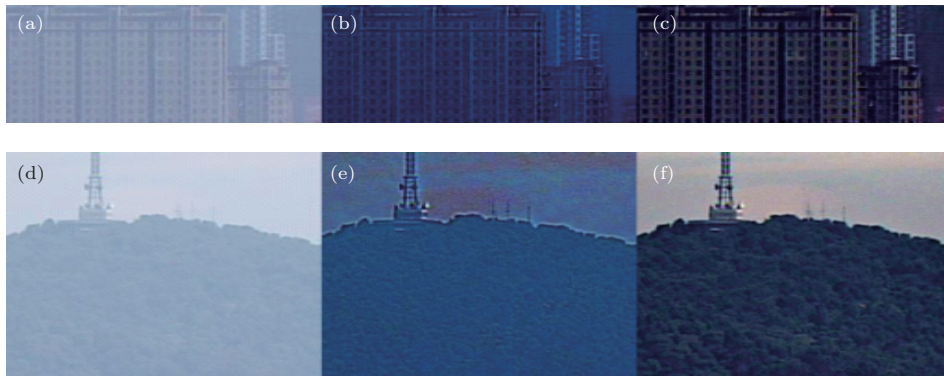


图8 不同校正方法结果 (a), (d)退化图像; (b), (e)暗像元方法; (c), (f) M'_{TF} 方法
Fig. 8. Results of different correction methods: (a), (d) Degraded image; (b), (e) dark pixel method; (c), (f) M'_{TF} method.

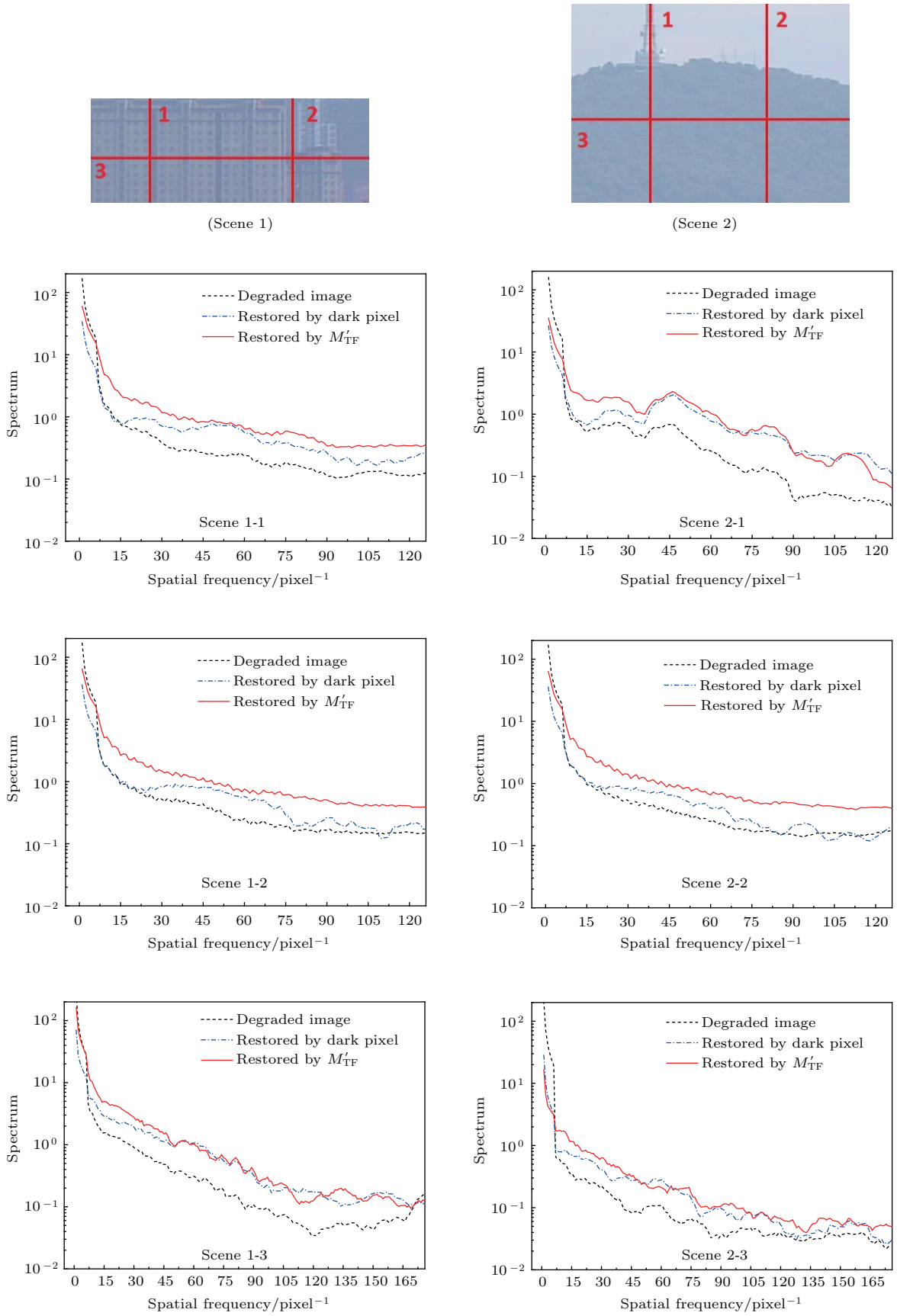


图9 不同校正方法感兴趣场景区域的频谱曲线对比

Fig. 9. Comparison of ROI's spectrum curves of different correction methods.

文中使用由平均梯度表征的经典质量评价方法^[3]对原图像及仿真图像进行定量地评价,如表2,表中也给出了图像的平均亮度.图像的平均梯度由(16)式给出:

$$\nabla \bar{g} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\nabla_i^2 I(i, j) + \nabla_j^2 I(i, j)}{2}}}{(M-1) \cdot (N-1)}, \quad (16)$$

其中 $\nabla_i^1(i, j)$, $\nabla_j^1(i, j)$ 分别为行列上的梯度.

结合上述仿真效果(图5—图7)和表2中定量结果可以看到,若仅考虑混浊大气介质衰减和多次散射影响,图像亮度变暗,对比度降低;当同时考虑混浊介质散射环境光的影响后,图像亮度增加,但对比度进一步降低.后者更符合天光背景下混浊大气中实际观测场景,这说明介质 M'_{TF} 可完整、真实有效地描述天光背景下图像大气传输的退化过程.平均梯度只能反映 M_{TF} 影响的图像质量退化,而不能反映 M'_{TF} 中零频率分量对图像质量的影响,因为后者造成的对比度降低可看作是在图像中增加了一个全局常量.因此, M'_{TF} 为图像质量分析提供了一种精细有效的方法.

4 成像质量优化评价

目前,提高图像质量的图像清晰化处理方法可以概括为两个方面,即空域方法^[15]和频域方法^[16].一种有效的图像清晰化处理方法必须要尽可能呈现出优于退化图像的场景细节,提高图像的辨识度^[17].从 M'_{TF} 来看,就是要尽可能提高图像的中高频,降低图像的零频.故而从空间频域的角度,本文提出一种可以表征校正方法优劣的定量评价方法,给出评价因子——谱面积 A_S ,即通过计算校正图像中感兴趣场景区域的频谱包围面积来比较图像质量:

$$A_S = \int_{\Omega=\Omega_0} F\{\text{ROI}(x, y)\} d\Omega, \quad (17)$$

其中, $F\{\text{ROI}(x, y)\}$ 表示感兴趣区域 $\text{ROI}(x, y)$ 的傅里叶变换频谱, Ω_0 为起始频率,从 M'_{TF} 来看,图像优化要降低图像的零频量,因此需要选取适当的起始频率,得到中高频对应的频谱面积才能表征对退化图像的校正程度,起始频率的选取与图像的频谱特征有关.

图8给出了利用暗像元先验方法^[18,19]和利用本文 M'_{TF} 进行逆滤波^[20]的方法对实际采集得到

的退化图像进行校正的结果.其中,目标场景图像的零频量是未知的,为了减小因大气介质散射环境光引起的 M'_{TF} 零频量的影响,首先通过暗像元先验方法得到散射环境光,然后从退化图像中去除;随后利用同步测量的能见度在水平均匀假设下获得路径光学厚度,通过等效原理得到大气介质衰减和多次散射贡献的 M_{TF} ,进而采用逆滤波得到最终的校正图像.

图9给出了每个场景中选取的三个感兴趣行列(图中红色实线标识)以及对应的退化图像、暗像元方法和 M'_{TF} 方法校正图像的频谱曲线,不同曲线所包围的面积,即评价因子 A_S 在图10中给出,其中 Ω_0 取 10 pixel^{-1} .可以看到,暗像元方法和 M'_{TF} 方法均明显提高了图像的中高频部分,校正图像的质量均要优于退化图像,此外, M'_{TF} 方法校正图像的中高频部分要优于暗像元方法,这说明前者更好地呈现出了图像的细节.从图像直观呈现和定量结果可以看到,评价因子 A_S 可以有效地表征图像中反映细节的中高频信息量,可以作为评价不同校正方法优劣的依据,这也进一步说明有效的校正方法必须要能明显地改善图像的中高频分量.

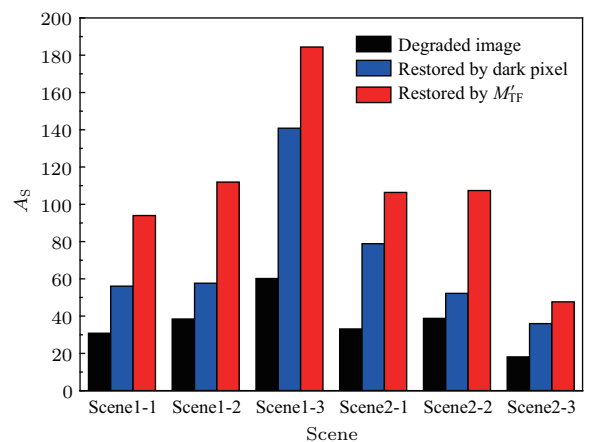


图10 不同校正方法感兴趣场景区域的频谱面积对比
Fig. 10. Comparison of ROI's A_S of different correction methods.

5 结 论

提出了天光背景下混浊大气介质对成像影响的 M'_{TF} ,从空间频域完整描述了天光背景下图像大气传输的退化过程,包括衰减、多次散射和环境光的影响.文中分析表明后者会对图像零频率分量和图像对比度产生重要影响, M'_{TF} 弥补了已有MTF模型对该因素描述的缺失.

M'_{TF} 为背景光存在下的图像质量分析提供了一种有效便捷的方法, 为研究图像大气传输退化机理、校正方法以及成像质量评价提供了更准确和有效的手段. 从本文给出的初步利用 M'_{TF} 对图像进行校正的结果来看, 该方法具有良好的效果和潜在的应用价值, 但同时也看到目前利用 M'_{TF} 对图像进行优化还存在需要改进的方面, 如完整的 M'_{TF} 的实时获取等.

针对提高图像质量的图像清晰化处理方法, 本文也从空间频域的角度提出一个评价因子, 即频谱面积, 其可有效地表征图像中反映场景细节的中高频信息量, 可以作为评价不同校正方法优劣的依据.

参考文献

- [1] Eismann M T 2012 *Hyperspectral Remote Sensing* (Washington: SPIE Press) pp1–81
- [2] Wang Z, Alan C B 2006 *Modern Image Quality Assessment* (USA: Morgan & Claypool Publishers) pp33–36
- [3] Xiong X H 2004 *Sci. Survey. Map.* **29** 1 (in Chinese) [熊兴华 2004 测绘科学 **29** 1]
- [4] Rao R Z 2012 *Modern Atmospheric Optics* (Beijing: Science Press) pp514–543 (in Chinese) [饶瑞中 2012 现代大气光学 (北京: 科学出版社) 第 514—543 页]
- [5] LeMaster D A, Esimann M T 2012 *Proc. SPIE* **8355** 1
- [6] Esimann M T, LeMaster D A 2013 *Opt. Eng.* **52** 046201
- [7] Lutomirski R F 1978 *Appl. Opt.* **17** 3915
- [8] Kopeika N S 1982 *J. Opt. Soc. Am.* **72** 548
- [9] Sadot D, Kopeika N S 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 172
- [10] Wells W H 1969 *J. Opt. Soc. Am.* **59** 686
- [11] Kuga Y, Ishimaru A 1986 *Appl. Opt.* **25** 4382
- [12] Rao R Z 2012 *Chin. Opt. Lett.* **10** 020101
- [13] Wu P F 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [武鹏飞 2013 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [14] Henyey L G, Greenstein J L 1941 *Astrophys. J.* **93** 70
- [15] Narasimhan S G, Nayar S K 2003 *IEEE Trans. PAMI* **25** 713
- [16] Norman S K 1998 *A System Engineering Approach to Imaging* (Washington: SPIE Press) pp517–541
- [17] Gerald C H (translated by Yan J X, Yu X, Xie T B, Yao H J) 2015 *Electro-Optical Imaging System Performance (Fourth Edition)*(Beijing: National Defense Industry Press) pp121–141 (in Chinese) [Gerald C H (阎吉祥, 俞信, 解天宝, 姚和军 译) 2015 光电成像系统性能 (第四版)(北京: 国防工业出版社) 第 121—141 页]
- [18] He K M, Sun J, Tang X O 2009 *IEEE Trans. PAMI* **33** 2341
- [19] He K M, Sun J, Tang X O 2013 *IEEE Trans. PAMI* **35** 1397
- [20] Gonzalez R C, Woods R E 2002 *Digital Image Processing (Second Edition)*(New Jersey: Prentice Hall) pp261–265

Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere*

Zheng Xin¹⁾²⁾ Wu Peng-Fei^{2)†} Rao Rui-Zhong¹⁾²⁾

1) (School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

2) (Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 10 December 2017; revised manuscript received 8 February 2018)

Abstract

Image quality is seriously degraded when propagating through the turbid atmosphere. It is practical to characterize the degradation process in terms of modulation transfer function (MTF). The MTF can describe the effect of the turbid medium on imaging quantitatively in spatial frequency domain, including attenuation and multiple scattering. It is inherent property of the turbid medium. The whole spatial frequency characteristic of the turbid atmosphere MTF can be acquired through the equivalence principle, i. e., the equivalence between the MTF of a turbid medium and the transmitted radiance from the medium under isotropic diffuse illumination. In practice, the image quality is not only affected by the turbid medium MTF but also related tightly to the background radiation.

The influence of scattered background radiation on imaging was almost not considered in the past when dealing with the imaging problem in the turbid atmosphere. In this paper, this issue is considered in detail. The analysis results demonstrate that the scattered background radiation increases the zero frequency component of image in spatial frequency domain. As a result, it degrades the image contrast seriously in spatial domain.

Based on the optical model of image degradation in the atmosphere, the theoretical analysis is carried out to study the image quality degradation process in spatial frequency domain. The formalized MTF is proposed, which considers the effects of attenuation, multiple scattering and scattered background radiation by the turbid medium on image quality. The quantitative relation among the formalized MTF, turbid medium MTF and background radiation is confirmed. Image blur simulations show that the results from the formalized MTF are more consistent with actual scenes than results only from turbid medium MTF. Thus, the formalized MTF can describe the image degradation process through atmosphere comprehensively.

The image restoration results indicate that the formalized MTF method performs better than dark channel prior method. In order to evaluate different image restoration methods effectively in spatial frequency domain, spectrum area (A_S) is proposed. The A_S is the area of middle-high frequency information of the region of interest in restored image. So A_S can represent the scene details in the restored image. The higher the A_S , the better the image quality is, which is demonstrated in this paper.

In conclusion, the formalized MTF provides a more effective method for image quality analysis and assessment. Additionally, it also supplies a new standpoint for researching atmospheric degradation mechanism and correction method for imaging in turbid atmosphere. Then, A_S can be an effective reference for correction to the method evaluation.

Keywords: image quality analysis, turbid medium, modulation transfer function, background radiation

PACS: 87.57.C-, 42.68.Ay, 42.30.Lr, 98.70.Vc

DOI: 10.7498/aps.67.20172625

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41505023).

† Corresponding author. E-mail: wupengfei@aiofm.ac.cn