

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2010.06.001

综 述

应用于图像复原的大气调制传递函数研究综述

袁宏武^{1,2}, 方 帅^{1,3}, 梅海平¹, 武鹏飞¹, 倪志波¹, 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 解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031;

3 合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 大气的吸收和散射以及湍流效应是造成大气中长距离成像质量下降的主要原因, 分析了导致图像恶化的大气因素和大气调制传递函数 (modulation transfer function, MTF)。由于准确获取大气 MTF 是以大气 MTF 的图像复原技术研究为基础, 较系统地总结了大气湍流和大气气溶胶的 MTF 理论结果, 给出了可能的应用思路。

关键词: 大气调制传递函数; 图像复原; 湍流; 大气气溶胶

中图分类号: P422.3

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2010)06-0407-07

Review of Atmospheric Modulation Transfer Function for Image Restoration

YUAN Hong-wu^{1,2}, FANG Shuai^{1,3}, MEI Hai-ping¹, WU Peng-fei¹,
NI Zhi-bo¹, RAO Rui-zhong¹

(1 Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China;

3 School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The image obtained through atmosphere is degraded due to its absorption, scattering, and turbulence effects of light propagation. The modulation transfer function (MTF) of both turbid and turbulence atmospheric media, which result in image degradation, are analyzed. It is primary to obtain atmospheric MTF accurately for studying image restoration based on MTF, the theories of both atmospheric turbulence MTF and aerosol MTF are systematically generalized and some possible applied ideas are provided.

Key words: atmospheric modulation transfer function; image restoration; turbulence; atmospheric aerosol

收稿日期: 2010-04-19; 修改日期: 2010-06-07

基金项目: 国家 863 项目、国家自然科学基金 (60705015) 资助

E-mail: yuan_hong_wu@163.com

1 引言

通常情况下,大气是影响图像质量的主要因素,特别是中长距离成像^[1]。影响成像效果的主要大气因素可分为混浊介质和湍流介质。混浊介质主要由离散的大气微粒即气溶胶粒子构成,湍流介质由密度起伏的大气分子构成^[2]。主要表现在如下几个方面:1)大气分子的吸收;2)气溶胶粒子的吸收和散射;3)光学湍流效应。大气分子和气溶胶粒子的吸收造成光能量的衰减,接收信号减弱,降低目标灰度,导致图像对比度下降,特别是在红外波段^[3]。

大气气溶胶的散射,主要是前向散射,导致成像细节的模糊,一般来说,时间上比较稳定。湍流介质的光传播效应是图像质量下降的主要原因之一,光波的光强起伏(闪烁)、相位起伏(波前倾斜)和到达角起伏(抖动)导致图像细节的扭曲和变形,并且具有较强的时间变化特征^[2]。

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(modulation transfer function, MTF)的卷积,因此针对大气模糊图像的复原,一个通用的方法就是使用简单的去卷积的技术,若知道大气 MTF 和噪声统计特性的先验知识,这种方法能较好地恢复出原始图像。该方法非常简单,成本低,有效性强,困难之处在于如何实时实地获取合理准确的大气 MTF^[4]。目前,常用的方法有两种:第一种方法是在成像的同时通过实际测量点扩散函数(point spread function, PSF)来获取 MTF,因为 MTF 是模糊图像的点扩散函数的归一化的傅立叶变换,但这种方法不太切合实际。另一种方法是预测法,通常认为大气 MTF 主要是由湍流 MTF 和气溶胶 MTF 组成,且两者相互独立,这种方法先分别预测湍流 MTF 和气溶胶 MTF 的值,然后将两者相乘作为大气 MTF 的近似,该方法能够满足图像的实时复原,具有较强的应用性^[5]。

2 大气 MTF 的研究现状

Hufnagel 和 Stanley 针对平均大气湍流的图

像降质效应,精确给出了平均大气湍流的光学传递函数,利用其预测了大气对图像的降质并使用观测数据加以验证^[6]。Fried 给出了光学传递函数的理论基础,分析并得到了利用波结构函数表示的长曝光平均湍流和短曝光平均湍流情况下的 MTF,并指出了使用短曝光平均湍流 MTF 比长曝光平均湍流 MTF 效果要好^[7]。Lutomirski 利用大气互相关函数 MCF 全面地分析了气体分子、湍流和气溶胶粒子对几种光电系统的影响,推导了 MCF 的解析表达式^[8]。Kopeika 等^[9-10]针对水平长距离成像,分析了湍流 MTF 在可见波段和近红外波段对图像质量的影响以及在红外波段背景热辐射对大气 MTF 的影响,指出了大气 MTF 公式中应该含有背景热辐射因素,特别是在红外波段。Kopeika 通过实验发现了气溶胶粒子散射的背景光与空间频率之间存在一定的关系,指出了背景光的空间频率依赖性会严重影响图像的分辨^[11]。Dinstein 等人针对近地面水平成像大气对图像质量影响问题,在对沙漠气候和非沙漠气候三年成像实验数据的基础上,利用大气 MTF 分析了图像质量与风速、温度和相对湿度间的关系,指出了可以利用气象数据来预测大气 MTF^[12]。Sadot 等人分析了利用标准气象数据预测折射率结构常数 C_n^2 的可行性,并给出两种计算 C_n^2 经验公式^[13]。Sadot、Kopeika 等通过一系列实验发现全面大气 MTF 和湍流 MTF 存在着明显的差别,除非在正午湍流最强时候,分析得出这可能是由于成像系统有关的气溶胶 MTF 造成的,对经典的气溶胶 MTF 公式进行了改进,加入了成像系统的视场角、动态范围和设备的空间频率等因素^[14-16]。正是这个模型的提出引起了一系列关于气溶胶散射对图像的影响以及气溶胶 MTF 激烈的科学讨论。Bissonnette 对此首先提出了不同的看法,他通过理论分析认为除非在冰云、大雾或者沙尘暴中大尺度粒子的情况下,由于气溶胶前向散射的 MTF 对全面的大气 MTF 的贡献非常小,而且在大多数实际情况下气溶胶 MTF 和频率间没有明显的依赖关系^[17]。然后,

Belen'kii 对使用改进的气溶胶 MTF 来解释全面大气 MTF 和湍流 MTF 的差异产生了疑问, 分析并得出了两者差异是由于湍流内尺度造成的, 而不是气溶胶散射造成的, 并据此提出了基于湍流内尺度和大气相干长度的湍流 MTF 模型^[18]。Ben Dor 等人针对 Bissonnette 和 Kopeika 关于图像模糊效应的争论, 提出了一个用于描述大气光学特性和成像系统本身特性间关系的物理模型, 并利用蒙特卡洛方法进行预测, 与 Kopeika 的实验结果进行了比较, 得出了改进的气溶胶 MTF 可能是不正确的结论^[19]。Sadot 和 Kopeika 等人对此一一做出回应^[19-22]。Golbraikn 等人研究了螺旋形湍流介质下的湍流 MTF 的形式和行为, 发现了当 Kolmogorov 湍流变换到螺旋形湍流, 湍流 MTF 和分辨率都发生了非常明显的变化, 尤其是短曝光湍流 MTF ^[23]。Buskila 等人通过实验分析了在红外波段的大气 MTF 的情况, 在近地面, 主要是湍流 MTF 起作用, 随着高度的增

加, 气溶胶 MTF 所占的比重增大。同时, 随着波长的增加, 湍流 MTF 和气溶胶 MTF 都随之增加, 但气溶胶 MTF 相对来说是主要的, 而且在热红外气溶胶 MTF 主要表现在吸收方面, 衰减了光的能量^[24]。Bendersky 等人通过实验分析了利用气象参数预测折射率结构常数 C_n^2 的经验公式有一定的限制范围, 对此进行了扩展, 并用实验数据进行了比较分析^[25]。

3 湍流 MTF

3.1 湍流 MTF

Hufnagel^[6] 和 Fried^[7] 已经给出了长曝光时间条件下, 湍流 MTF 为

$$MTF_{\text{tur_le}} = \exp\left[-\frac{1}{2}D(\rho, z)\right], \quad (1)$$

其中; $D(\rho, z)$ 代表波结构函数, z 代表传播距离, ρ 为横向距离, 对于平面波来说, $D(\rho, z)$ 可表示为^[26]

$$D(\rho, z) = \begin{cases} 2.9143k^2\rho^{5/3} \int_0^L C_n^2(z)dz, & \rho \gg l_0 \\ 1.9542k^2l_0^{-1/3}\rho^2 \int_0^L C_n^2(z)dz, & \rho \ll l_0 \end{cases}, \quad (2)$$

将其代入公式 (1), 可以得到平面波在长曝光情况下的湍流 MTF ^[7,9]

$$MTF_{\text{tur_le}} = \exp\left[-57.44\lambda^{-1/3}(f_r f_l)^{5/3} \times \int_0^L C_n^2(z)dz\right], \quad (3)$$

其中, λ 为波长, f_l 为成像系统的焦距长度, f_r 为空间频率, $f_r = \rho/(\lambda f_l)$, L 为传播距离。

对于曝光时间比较短的情况, 由于短曝光情况下, 图像的像质不受波前的歪斜分量的影响, 因此需要先从相位中去掉波前的歪斜, 然后再平均。Fried 给出了平面波在短曝光的情况下的湍流 MTF ^[7,11]

$$MTF_{\text{tur_se}} = \exp\left\{-57.44\lambda^{-1/3}(f_r f_l)^{5/3} \times \int_0^L C_n^2(z)dz \times [1 - a(\lambda f_r f_l / D)^{1/3}]\right\}, \quad (4)$$

其中, D 为成像系统的口径, a 为调节系数, 当 a 为近场时, a 取值 1; 当 a 为远场时, a 取值为 0.5; 通常情况下, 如果 $D \gg (L\lambda)^{1/2}$ 为近场, $D \ll (L\lambda)^{1/2}$ 为远场。当 $a = 0$ 时, (4) 式即为长曝光的湍流 MTF ; 当 $a \neq 0$ 时, 导致 MTF 的增大, 正好反映了相位歪斜分量对像质没有影响的事实, 而且远场情况下相位所起的作用不如在近场重要, 在近场情况下, 全部模糊来自相位效应, 而在远场情况下, 只有一半模糊来自相位扰动, 另一半则来自振幅效应^[27]。

3.2 C_n^2 的预测模型

通常认为,湍流是与微气象参数有关的,但在实际成像过程中,获取微气象参数是非常困难的,因此,如果能用宏观的气象参数如温度、风速和风向、相对湿度来预测 C_n^2 ,在工程上具有较强的应用性。Sadot 等人就分析了这种方法的可行性并提出了利用宏观气象参数预测 C_n^2 的经验公式,参见式 (5)、(6)^[12-13]。

$$C_n^2 = a_1W + b_1T + c_1RH + c_2RH^2 + c_3RH^3 + d_1WS + d_2WS^3 + e, \quad (5)$$

表 1 权重函数

Table 1 Weight function

| Sun | Temporal hour interval | Relative weight (W) |
|---------|------------------------|---------------------|
| | until -4 | 0.11 |
| | -4 to -3 | 0.11 |
| | -3 to -2 | 0.07 |
| | -2 to -1 | 0.08 |
| | -1 to 0 | 0.06 |
| sunrise | 0 to 1 | 0.05 |
| | 1 to 2 | 0.1 |
| | 2 to 3 | 0.51 |
| | 3 to 4 | 0.75 |
| | 4 to 5 | 0.95 |
| | 5 to 6 | 1.0 |
| | 6 to 7 | 0.9 |
| | 7 to 8 | 0.8 |
| | 8 to 9 | 0.59 |
| | 9 to 10 | 0.32 |
| | 10 to 11 | 0.22 |
| sunset | 11 to 12 | 0.1 |
| | 12 to 13 | 0.08 |
| | over 13 | 0.13 |

其中, W 为时间权重,取值见表 1; T 是温度,单位 K; RH 是相对湿度,单位为 %; WS 为风速,单位为 m/s; a_1, b_1, \dots, e 为系数,取值见表 2。

$$C_n^2 = A_1W + B_1T + C_1RH + C_2RH^2 + C_3RH^3 + D_1WS + D_2WS^2 + D_3WS^3 + E_1flux + F_1TCSA + F_2TCSA^2 + G, \quad (6)$$

其中, W 为时间权重,取值参见表 1; T 是温度,单位 K; RH 是相对湿度,单位为 %; WS 为风速,单位为 m/s; $TCSA$ 为单位 m^3 的总散射截面,单位为 $cm^2 \cdot m^{-3}$; $flux$ 为太阳流量,单位为 $Cal \cdot cm^{-2} \cdot min^{-1}$; A_1, B_1, \dots, G 为系数,取值参见表 2。

表 2 两种模型中退化系数

Table 2 Regress coefficient values for two type models for $C_n^2(m^{-2/3})$

| | | | | | |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|
| a_1 | 3.8E-14 | A_1 | 5.9E-15 | F_1 | -1.8E-14 |
| b_1 | 2.0E-15 | B_1 | 1.6E-15 | F_2 | 1.4E-14 |
| c_1 | -2.8E-15 | C_1 | -3.7E-15 | G | -3.9E-13 |
| c_2 | 2.9E-17 | C_2 | 6.7E-17 | | |
| c_3 | -1.1E-19 | C_3 | -3.9E-19 | | |
| d_1 | -2.5E-15 | D_1 | -3.7E-15 | | |
| d_2 | 1.2E-15 | D_2 | 1.3E-15 | | |
| d_3 | -8.5E-17 | D_3 | -8.2E-17 | | |
| e | -5.3E-13 | E_1 | 2.8E-14 | | |

4 大气气溶胶 MTF

4.1 经典气溶胶 MTF

Lutomirski 通过对平面波经过气溶胶介质后的空间相干性分析,得出了大气气溶胶的 MTF^[8],如式 (7) 所示。其中, A_a 为气溶胶吸收系数, S_a 为气溶胶的散射系数, Ω 为空间频率, $\Omega_c = \frac{a}{\lambda f_1}$, 称之为空间截止频率。

$$MTF_{aero} = \begin{cases} \exp(-A_a z) \exp[-(\frac{\Omega}{\Omega_c})^2 S_a z], & \Omega \ll \Omega_c \\ \exp[-(A_a + S_a)z], & \Omega \gg \Omega_c \end{cases} \quad (7)$$

4.2 改进的气溶胶 MTF

Sadot 和 Kopeika 等人认为经典大气气溶胶 MTF 没有严格区分光的成份, 在所有的空间频率, 其粒子的吸收为常数是不对的, 特别是在长波段即中远红外, 气溶胶粒子及其大气分子的吸收在整个 MTF 值中占有相当大的部分 [3]。图 1 给出了点目标经过大气介质后, 成像 CCD 所接收到光的成份。从图中可以看出, 到达成像平面包含被介质粒子散射的散射光和非散射光。散射光的到达角较大, 范围比较广, 非散射光到达角度比较小, 集中在光线左右比较小的范围。从空间频率来说, 散射光处于低频阶段, 非散射光处于高频段。

而从经典气溶胶 MTF 来看, 气溶胶的吸收型 $\exp(-A_a z)$ 无论空间频率如何变化始终是个常数。众所周知, 气溶胶 MTF 中的吸收效应在低频段较小, 在高频段非常的明显。Sadot 和 Kopeika 认为, 在低频段接收到的主要是散射光, 在高频段接收到的是非散射光。所以需要进行改进 [3,19-20,22]

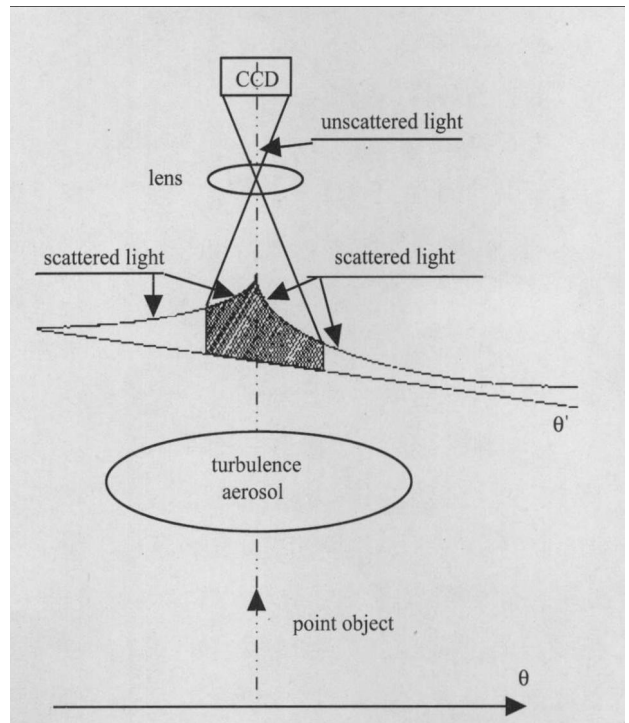


图 1 点目标的光经过湍流及散射介质传输到成像平面的示意图

Fig.1 Propagation of angular point object through turbulent and scattering atmosphere

$$MTF_{aero_ns} = \begin{cases} A_b(\Omega) \exp[-(\frac{\Omega}{\Omega_c})^2 S_a z], & \Omega \leq \Omega_c \\ A_b(\Omega) \exp[-S_a z], & \Omega > \Omega_c \end{cases}, \quad (8)$$

其中, $A_b(\Omega)$ 为

$$A_b(\Omega) = \exp[K(\Omega)(-A_a z)], \quad (9)$$

K 的物理意义是成像系统接收到的非散射光能量与接收到的总能量的比值, 其表达式为 [3]

$$K(\Omega) = \begin{cases} \frac{\int \exp(-S_a z) d\Omega}{\int \exp[-(\frac{\Omega}{\Omega_c})^2 S_a z] d\Omega} = \exp\left\{-S_a z \left[1 - (\frac{\Omega}{\Omega_c})^2\right]\right\}, & \Omega \leq \Omega_c \\ 1, & \Omega > \Omega_c \end{cases} \quad (10)$$

5 小 结

在图像复原中,比较准确的预测大气 MTF 是图像复原的关键。文中比较全面地总结了湍流的 MTF 和大气气溶胶 MTF 的主要研究成果,为下一步图像复原工作奠定了理论基础。

在计算大气 MTF 时,以下几个问题可能值得注意,列出以供参考:

1) 成像系统的曝光时间。曝光时间的长短决定了计算大气湍流 MTF 的公式,通常情况下短于几个 ms 属于短曝光,须使用大气湍流的短曝光 MTF 公式,反之,应使用大气湍流的长曝光 MTF 公式。实验已证明,大多数情况下,利用短曝光的 MTF 公式,对图像恢复的效果更好。

2) 公式的推导条件。文中假设入射到大气介质(包括大气湍流和大气气溶胶)的是单位平面波,由于 MTF 是空间相关函数,所以能量的大小并不影响最后得到的 MTF 大小。式(3)和(4)所表征的长曝光 MTF 和短曝光的 MTF ,使用的是平面波的波结构函数,如果是球面波,则需要使用球面波的波结构函数。对于大气气溶胶粒子来说,经过散射后,光波近似为球面波,所以在推导大气气溶胶 MTF 时,使用的是球面波。

3) 应用气溶胶 MTF 可能存在的问题。在经典气溶胶 MTF 中计算分为两种情况,即空间频率远大于空间截止频率和空间频率远小于空间截止频率,但实际应用时,基本上都是按照小于等于空间截止频率和大于空间截止频率两种情况来处理,在改进的气溶胶 MTF 中也是如此处理的,这种处理是否得当还需进一步探讨。

4) 关于改进的气溶胶 MTF 的使用问题。自从 Sadot 和 Kopeika 提出改进的气溶胶 MTF 以来,在学术界引起了广泛的争议和辩论,但至今为止,也没有个明确的结论。从国内发表的相关文献来看,经典 MTF 仍然在使用^[28]。

参考文献:

- [1] Sadot D, Rosenfeld A, Shuker G, et al. High resolution restoration of images distorted by the atmosphere based upon average atmospheric MTF [C]. *SPIE*, 1994, **2222**: 656-666.
- [2] Rao Ruizhong, Huang Honghua, Huang Yinbo, et al. Analysis of the influence of the optical property of atmosphere on target imaeing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(3): 414-419(in Chinese).
- 饶瑞中, 黄宏华, 黄印博, 等. 大气光学特性对目标成像影响的分析 [J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(3): 414-419.
- [3] Kopeika N S. Aerosol modulation transfer function: an overview [C]. *SPIE*, 1997, **3125**: 214-225.
- [4] Yitzhaky Y, Dror I, Kopeika N S. Restoration of atmospherically blurred images according to weather predicted atmospheric modulation transfer functions [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(11): 3064-3072.
- [5] Kopeika N S, Sheayik T, Givati Z, et al. Restoration of satellite images based on atmospheric MTF [C]. *SPIE*, 1996, **2817**: 106-117.
- [6] Hufnagel R E, Stanley N R. Modulation transfer function associated with image transmission with turbulent media [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1964, **54**(1): 52-60.
- [7] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposure [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(10): 1372-1379.
- [8] Lutomirski R F. Atmospheric degradation of electrooptical system performance [J]. *Appl. Opt. Am.*, 1978, **17**(24): 3915-3921.
- [9] Kopeika N S. Spectral characteristics of image quality for imaging horizontally through the atmospher [J]. *Appl. Opt. Am.*, 1977, **16**(9): 2422-2426.

- [10] Kopeika N S, Solomon S, Gencay Y. Wavelength variation of visible and near-infrared resolution through the atmosphere: dependence on aerosol and meteorological conditions [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(7): 892-901.
- [11] Kopeika N S. General wavelength dependence of imaging through the atmosphere [J]. *Appl. Opt. Am.*, 1981, **20**(9): 1532-1536.
- [12] Dinstein I, Zoabi H, Kopeika N S. Prediction of effects of weather on image quality: preliminary results of model validation [J]. *Appl. Opt. Am.*, 1988, **27**(12): 2539-2545.
- [13] Sadot D, Kopeika N S. Forecasting optical turbulence strength on the basis of macroscale meteorology and aerosols: models and validation [J]. *Opt. Eng. Am.*, 1992, **31**(2): 200-212.
- [14] Dror I, Kopeika N S. Aerosol and turbulence modulation transfer functions: comparison measurements in the open atmosphere [J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(21): 1532-1534.
- [15] Sadot D, Melamed A, Dinur N. Effects of aerosol forward scatter on long and short exposure atmospheric coherence diameter [C]. *SPIE*, 1994, **2222**: 499-510.
- [16] Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere: practical instrument-based theory and verification of aerosol modulation transfer function [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1993, **10**(1): 172-179.
- [17] Bissonnette L R. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of atmospheric modulation transfer function: comment [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1994, **11**(3): 1175-1179.
- [18] Belen'kii M S. Effect of the inner scale of turbulence on the atmospheric modulation transfer [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(5): 1078-1082.
- [19] Ben Dor B, Devir A D, Shaviv G. Atmospheric scattering effect on spatial resolution of image systems [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1996, **14**(6): 1329-1337.
- [20] Kopeika N S, Sadot D. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function: reply to comment [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1995, **12**(5): 1017-1023.
- [21] Kopeika N S, Sadot D, Dror I. Aerosol light scatter vs turbulence effects in image blur [C]. *SPIE*, 1998, **3219**: 44-51.
- [22] Kopeika N S, Dror I, Sadot D. Causes of atmospheric blur: comment on Atmospheric scattering effect on spatial resolution of image systems [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1998, **15**(12): 3097-3106.
- [23] Golbraikn E, Kopeika N. Changes in modulation transfer function and optical resolution in helical turbulent media [J]. *Opt. Soc. Am.*, 2002, **19**(9): 1774-1778.
- [24] Buskila K, Towito S, Shumel E et al. Atmospheric modulation transfer function in the infrared [J]. *Appl. Opt. Am.*, 2004, **43**(2): 471-482.
- [25] Bendersky S, Kopeika N S, Blaunstein N. Atmospheric optical turbulence over land in middle east coastal environments: prediction modeling and measurements [J]. *Appl. Opt. Am.*, 2004, **43**(20): 4070-4079.
- [26] Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005: 150-153(in Chinese).
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 150-153.
- [27] Goodman J W. *Statistical Optics* [M]. New York: Wiley Classic Library Edition Published, 2000: 433-440.
- [28] Wang Zhenguang, Geng Zexun, Zhao Zhenlei, et al. Restoration of remote-sensing images based on meteorologic data [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(3): 110-114(in Chinese).
王振国, 耿则勋, 赵振雷, 等. 气象参数估计大气 MTF 的遥感影像恢复 [J]. 光电工程, 2009, **36**(3): 110-114.

作者简介: 袁宏武 (1979-), 男, 安徽六安人, 博士研究生, 讲师, 主要从事激光传输、图像复原方面的研究。