

气溶胶散射对长波红外成像系统影响的测量与建模^{*}夏侯琪¹⁾²⁾³⁾ 熊伟^{1)2)3)†} 吴军^{1)2)3)‡} 李大成¹⁾²⁾³⁾ 崔方晓¹⁾³⁾ 程晨¹⁾³⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

3) (光学定量遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031)

(2026 年 3 月 4 日收到; 2026 年 3 月 13 日收到修改稿)

气溶胶散射会降低红外图像质量. 尽管气溶胶散射贡献在已有研究中得到验证, 但其对成像质量退化的重要性仍存在争议. 由于大气传输效应与成像系统特性高度耦合, 且大气环境参数通常难以精确表征, 气溶胶影响的实测结果与理论建模之间的对比分析较为困难. 针对上述问题, 本文首先以调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 作为成像质量的定量表征参数, 给出了气溶胶散射效应理论建模与外场实测方法; 之后通过外场成像试验及同步气象参数观测, 对成像系统、湍流及气溶胶散射贡献进行了仿真; 进而分别利用 MODTRAN 城市型气溶胶模式、CE318 太阳光度计反演数据, 对气溶胶影响进行了建模; 试验结果表明, 气溶胶 MTF 建模与实测结果表现出较好的一致性, 二者均方误差为 1.8%. 该研究结果为气溶胶散射对长波红外成像退化机理分析及成像性能预测提供了试验依据与方法参考.

关键词: 气溶胶, 散射, 成像模糊, 调制传递函数**DOI:** 10.7498/aps.75.20260313**CSTR:** 32037.14.aps.75.20260313

1 引言

在长波红外成像系统的目标观测过程中, 传输路径上的大气环境会引起成像质量退化, 而成像质量作为系统性能的直观表征, 其影响因素始终是相关研究的关注重点. 传统认知认为, 长波红外波段内气溶胶粒径通常小于辐射波长, 其散射效应随波长增大显著减弱, 因此在长波红外成像分析中, 大气影响主要归因于气体吸收衰减^[1], 气溶胶作用多以整体消光衰减形式加以考虑^[2,3]. 然而, 针对目标捕获问题的研究表明, 仅以大气消光系数描述辐射衰减难以准确反映大气影响^[4]. 相关试验结果指出, 大气对目标捕获能力的主要限制并非辐射能量的衰减, 而是由于其对不同空间频率成分影响程度不

同, 表现为成像模糊效应^[5-7]. 尤其在观测视线离地面数米以上时, 气溶胶散射引起的图像模糊甚至超过大气湍流的影响. 因此, 在分析长波红外成像质量退化机理时, 气溶胶引起的成像模糊不容忽视, 其作用机理及定量表征仍是成像质量研究中的关键问题.

早期研究基于辐射传输理论^[8-12]或蒙特卡罗方法^[13,14]建立了多种气溶胶 MTF 模型, 用于描述气溶胶散射引起的成像模糊特性, 为气溶胶散射建模提供了重要理论工具. 气溶胶 MTF 通常呈现两段式特征: 在高于截止频率的区域基本保持恒定, 而在低于截止频率的区域随空间频率降低呈指数增长, 该截止频率取决于成像系统可接收的散射光最大角度. 这些模型主要针对传输路径上的固有大气 MTF, 未考虑实际的仪器效应. 随后试验研究

* 高分专项 (批准号: 52-L10D01-0613-20/22) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 42105082) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: frank@aiofm.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wujun@aiofm.ac.cn

发现, 实测获得的气溶胶 MTF 在函数形态上与理论模型基本一致, 但其特征截止频率显著高于经典理论预期^[15]. 该差异的物理原因在于成像系统对散射光接收角度的限制效应. 由于探测器瞬时视场约束, 能够参与成像的散射辐射通常被限制在毫弧度量级, 从而导致像面气溶胶 MTF 的有效截止频率远高于未考虑仪器效应时的理论值. 基于此, 和 Sadot 和 Kopeika^[16] 提出了考虑仪器参数的实用气溶胶 MTF 模型, 有效解释了截止频率偏高的原因. 进一步研究表明, 即使在无雾条件下, 沙尘、盐粒等常见大气颗粒物产生的小角度前向散射亦可能引入可观的图像模糊效应^[17-19]. 相关结论在后续建模与仿真研究中得到支持^[20,21]. 然而也有研究指出, 气溶胶导致的对比度降低与空间频率无关, 因此图像模糊可忽略不计^[22,23], 这种差异源于仪器视场截断了实际可记录的散射角, 导致气溶胶影响无法被有效捕捉, 或者观测条件本身受气溶胶影响不大.

随着研究的深入, 学者们逐渐将关注点从散射机理本身扩展至模型预测与探测器观测之间的一致性问题上. 研究指出, 即使散射物理过程保持一致, 不同成像系统参数配置亦可能导致气溶胶模糊表现形式存在差异^[24]. Packard 等^[25] 通过实验室云室的可控气溶胶条件, 验证了气溶胶散射引起的图像模糊确实可被探测器测量, 但其表现形式受到粒径分布、探测器动态范围及量化噪声的显著影响. Butrimas 等^[26] 在湿热海洋性环境下测量了气溶胶 MTF, 试验结果表明气溶胶散射可引入显著的空间频率相关成像模糊, 但基于 MODTRAN 的数值模型难以准确重现实测气溶胶 MTF. 近期, Aaron 等开展了外场实验, 通过联合测量粒子数浓度、粒径分布及散射光学参数, 并与图像 MTF 退化进行相关分析, 证实了气溶胶模糊与粒子形态及散射特性之间的统计联系, 但试验数据仅在可见光波段测量^[27,28].

综上所述, 现有研究对气溶胶模糊效应的重要性存在分歧, 其争议主要在于气溶胶散射对图像模糊的影响程度以及试验测量的局限性两方面. 当前公开报道的外场实测研究数量仍相对有限, 加之气溶胶时空分布特性的准确表征存在挑战, 使得理论预测与实测成像性能之间的定量对比分析仍面临较大不确定性.

针对上述问题, 本文围绕气溶胶散射对长波红

外成像质量的影响, 开展了理论建模与外场实测相结合的系统研究. 首先, 从成像系统在大气传输条件下的成像机理出发, 阐述了系统整体 MTF 的组成关系, 并介绍了气溶胶 MTF 的理论模型及其外场测量方法; 其次, 依据模型对系统参数与环境条件的要求, 设计并开展了外场长波红外成像试验, 获取了不同气溶胶条件下的刃边靶标红外图像及同步气象观测数据; 在此基础上, 实现了气溶胶 MTF 实测值的分离与基于典型气溶胶模式的理论建模; 进一步地, 针对典型气溶胶模式难以准确反映实际观测环境的问题, 基于多波段光学厚度观测数据反演获得的气溶胶组分, 对气溶胶光学参数建模进行了改进; 最后, 对系统总 MTF 与相机 MTF 因不同对焦距离设置引起的细微差异进行了修正, 进一步提高了理论建模结果与实测结果的一致性. 上述研究系统评估了气溶胶散射对长波红外成像质量的影响程度, 为理解气溶胶散射对红外成像的影响提供了可靠的实验依据.

2 大气 MTF 理论模型与测量方法

在外场观测条件下, 大气效应与成像系统特性本身高度耦合, 实测成像模糊反映的是系统整体响应. 为明确不同因素在成像退化中的作用, 首先给出系统整体 MTF 响应的组成关系; 随后分别介绍大气湍流与气溶胶散射对 MTF 的影响机理及其常用建模方法; 在此基础上, 进一步阐述本文采用的气溶胶 MTF 测量思路, 为后续气溶胶 MTF 测量试验设计及结果分析提供方法依据.

2.1 成像系统 MTF 组成

在外场观测条件下, 系统整体空间频率响应可以视为多种因素共同作用的结果, 成像系统的总 MTF_{total} 可表示为系统本身 MTF_{sys} 与大气效应 MTF_{atmosphere} 的综合影响:

$$\text{MTF}_{\text{total}}(f) = \text{MTF}_{\text{atmosphere}}(f) \text{MTF}_{\text{sys}}(f), \quad (1)$$

其中, 系统本身的 MTF_{sys} 主要由光学系统像差、衍射效应和探测器采样等因素决定, 可在实验室内或大气影响微弱的近距离观测条件下进行测量. 大气 MTF_{atmosphere} 可看作由大气湍流效应引起的 MTF_{turb} 和气溶胶散射引起的 MTF_{aerosol} 两部分组成, 通过分析各项 MTF 之间的关系可以确定系统性能.

2.2 大气湍流 MTF 的理论模型

大气湍流与气溶胶散射共同作用于红外辐射的传输过程, 为在后续分析中分离气溶胶散射对成像质量的影响, 有必要对大气湍流引起的成像退化进行建模描述. Fried 提出的大气湍流 MTF 表达式如下:

$$\text{MTF}_{\text{turb}} = \exp \left\{ -3.44 \left(\frac{\lambda f_x}{r_0} \right)^{5/3} \left[1 - \alpha \left(\frac{\lambda f_x}{D} \right)^{1/3} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中, λ 是中心波长; f_x 是空间频率; r_0 是相干直径; D 是系统入瞳直径; α 为不同条件下的修正因子.

相干直径 r_0 由传输路径上大气折射率结构常数的积分确定:

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} \left[\int_0^L \left(\frac{l}{L} \right)^{5/3} C_n^2(l) dl \right]^{-3/5}, \quad (3)$$

式中, L 表示目标至成像系统的传输路径长度; $C_n^2(l)$ 为沿路径分布的大气折射率结构常数. 定量表征大气湍流影响的关键在于大气折射率结构常数的获取.

2.3 气溶胶 MTF 理论模型

气溶胶散射会改变目标辐射的角分布, 使能量在空间上重新分布. 如图 1(a) 所示, 到达成像系统探测面的总辐射包含未散射和已散射两个分量: 其中未发生散射的直达辐射在角空间域内表现为无展宽的理想冲激函数; 经过气溶胶散射后仍进入系统视场的散射辐射则具有较宽的角分布. 偏离原来路径的散射光在目标周围形成“光晕”, 主要削弱

高空间频率成分, 是导致图像细节模糊的主要原因. 系统最终接收到的是这两部分辐射分量叠加的结果.

在长波红外波段, 气溶胶粒径通常与工作波长处于同一数量级, 其散射过程以 Mie 散射为主. 当粒径与波长相当或更大时, Mie 散射表现出明显的前向散射特性, 即散射能量主要集中在小角度范围内^[29], 导致散射能量主要在近轴方向产生空间扩展. 将这种空间分布特性转换至频域, 如图 1(b) 所示, 未散射光因无角展宽而对所有空间频率成分保持恒定的传递能力, 而具有宽角分布的散射光则表现为集中在低频区域的窄带响应. 然而基于 Mie 理论进行精确散射建模需获取粒径分布、复折射率及散射相函数等详细信息, 计算复杂且参数获取困难^[30]. 该方法基于辐射传输过程描述, 难以直接与成像系统的空间频率响应建立联系.

为在保持物理合理性的同时降低模型复杂度, 研究引入小角近似 (small-angle approximation, SAA) 理论对气溶胶散射过程进行描述, 通过假设小角散射相函数遵循高斯分布形式^[8,10], 推导了经典气溶胶 MTF 的渐近表达式:

$$\text{MTF}(f) = \begin{cases} \exp \left[-\alpha z - \beta z \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right], & f < f_c, \\ \exp [-(\alpha + \beta) z], & f > f_c, \end{cases} \quad (4)$$

式中, f 为空间频率; f_c 为气溶胶截止频率, 在 mie 散射条件下, 前向散射的偏离角度不超过 $\theta_{\max} = \lambda/r$, r 为气溶胶半径, λ 表示波长, 因此气溶胶截止频率可表示为 $f_c = 1/\theta_{\max} = r/\lambda$, z 为传输路径长度, β 为气溶胶散射系数, α 为吸收系数.

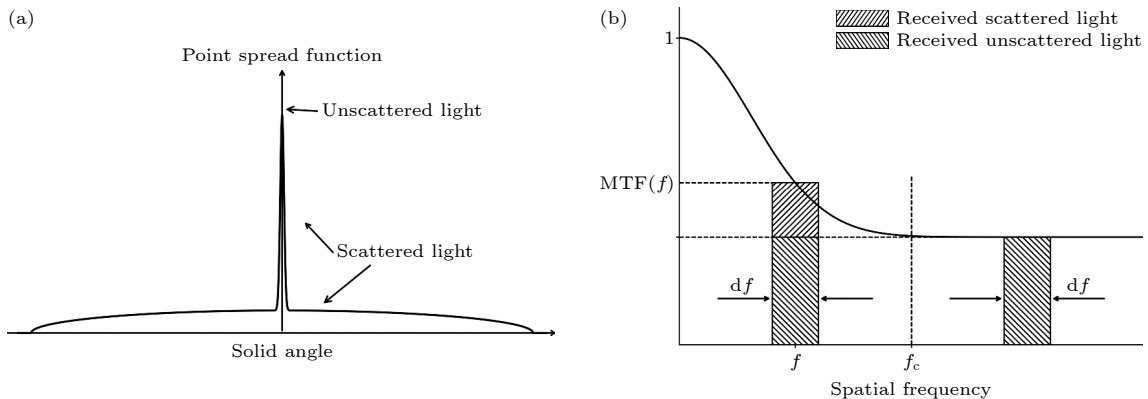


图 1 气溶胶散射对辐射能量分布及空间频率响应的影响机制 (a) 空间域的辐射角分布; (b) 频域的气溶胶调制传递函数衰减特性

Fig. 1. Mechanism of aerosol scattering effects on radiative energy distribution and spatial frequency response: (a) Angular distribution of radiance in the spatial domain; (b) attenuation characteristics of the aerosol modulation transfer function in the frequency domain.

但根据能量守恒原理, 在单次散射近似下, 入射到单个气溶胶粒子的光子只能发生两种互斥的过程之一: 要么被粒子散射改变传播方向, 要么被粒子吸收转化为其他形式能量, 两者不会同时发

生. Sadot 和 Kopeika 基于能量守恒原理对经典气溶胶模型进行了修正^[31], 推导了气溶胶调制传递函数的广义表达式, 其形式可写为

$$\text{MTF}_{\text{aerosol}}(z, f) = \begin{cases} \exp[-\beta z(f/f_c)^2] \cdot \exp\left\{\exp[-\beta z(1 - (f/f_c)^2)](-\alpha z)\right\}, & f < f_c, \\ \exp(-\beta z) \cdot \exp(-\alpha z), & f > f_c. \end{cases} \quad (5)$$

由于 MTF 在零空间频率处应取值 1, 还需对上述公式除以 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}(f=0)$ 进行归一化处理, 得到气溶胶作用下成像系统调制传递函数的最终表达式为

$$\text{MTF}_{\text{aerosol}}(z, f) = \begin{cases} \exp[-\beta z(f/f_c)^2] \exp\{-\alpha z[\exp(-\beta z[1 - (f/f_c)^2]) - \exp(-\beta z)]\}, & f \leq f_c, \\ \exp(-\beta z) \exp\{-\alpha z[1 - \exp(-\beta z)]\}, & f > f_c. \end{cases} \quad (6)$$

基于上述理论模型, 在已知气溶胶散射系数和吸收系数的条件下, 可以实现对气溶胶 MTF 的建模分析. 然而理论推导的截止频率基于理想条件, 仪器视场以及动态范围会限制可接收散射光的最大偏离角度, 使得实际进入成像光路的散射分量通常小于理论值.

为获得与实际观测条件相匹配的有效气溶胶截止频率, 可以采用图像分析方法, 通过提取红外刃边图像的边缘扩展函数 (edge spread function, ESF), 并分析其角度展宽范围. 由于气溶胶散射的影响, 理想的阶跃边缘会在图像中表现为具有一定宽度的过渡区. ESF 在角度坐标下从目标灰度逐渐过渡至背景灰度, 并趋于稳定的范围定义为 ESF 的有效展宽角度 2θ , 其中 θ 表示该过渡区域的半角展宽范围. 有效截止频率定义为^[26]

$$f_c = \frac{1}{2\theta}. \quad (7)$$

2.4 气溶胶 MTF 测量

由于红外成像系统的空间频率响应同时受到系统自身性能以及大气效应的共同影响, 气溶胶散射对成像的影响无法直接测量, 需要通过系统总 MTF 的实测结果进行间接提取. 假设系统和大气影响是相互独立的, 气溶胶 MTF 可以通过从系统总 MTF 中除以系统本身 MTF 和湍流 MTF 进行计算:

$$\text{MTF}_{\text{aerosol}} = \frac{\text{MTF}_{\text{total}}}{\text{MTF}_{\text{sys}} \text{MTF}_{\text{turb}}}, \quad (8)$$

式中, $\text{MTF}_{\text{total}}$ 表示系统总 MTF; MTF_{sys} 是系统本

身的 MTF.

$\text{MTF}_{\text{total}}$ 可以通过成像系统的实测红外图像测量, 在多种测量方法中, 基于刃边靶成像的 MTF 测量方法具有靶标结构简单、易于实现等优点. 该方法通过单一倾斜刃边靶标的成像图即可获得被测系统在完整空间频率范围内的 MTF 信息, 因此在红外成像系统性能测试中得到了广泛应用. 通过测量图像总 $\text{MTF}_{\text{total}}$ 、系统自身 MTF_{sys} 和大气湍流 MTF_{turb} , 即可求得气溶胶贡献 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$.

3 试验方案与数据

基于第 2 节介绍的大气 MTF 理论模型和气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 的获取方法, 为在真实外场条件下观测气溶胶散射对长波红外成像质量的影响, 针对性地设计并开展了外场连续成像试验. 试验选择低湍流时段, 使气溶胶散射成为影响系统 $\text{MTF}_{\text{total}}$ 的主导因素, 从而减少后续气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 提取的误差.

3.1 试验方案

图 2 为气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 的实测与理论建模流程. 首先, 通过远距离观测的刃边图像计算系统总 $\text{MTF}_{\text{total}}$; 同时, 基于近距离采集的刃边图像计算成像系统自身 MTF_{sys} , 用于表征探测器及光学系统的固有响应特性. 针对大气湍流影响, 结合同步测量的大气折射率结构常数, 基于湍流 MTF_{turb} 理论模型计算得到对应观测条件下的大气湍流 MTF_{turb} . 在此基础上, 通过系统总 $\text{MTF}_{\text{total}}$ 剔除系统自身 MTF_{sys}

与湍流 MTF_{trub} 的贡献, 实现气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的分离提取.

对于理论建模, 本文采用两种不同的方法确定气溶胶光学参数. 第一种方法基于常规气象观测参数, 利用实测气温、相对湿度及能见度等数据, 结合辐射传输模型计算结果推导气溶胶散射系数与吸收系数. 第二种方法则基于气溶胶观测数据计算散射系数与吸收系数. 上述两种方法得到的数据代入理论模型, 用于气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 建模. 通过对两种建模结果与实测气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的对比, 系统地评估不同气溶胶参数表征方式对建模精度的影响, 并验证理论模型在实际大气环境下的适用性.

根据气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 建模与测量方法需要的数据, 设计了对应的试验流程, 主要包括成像系统选择和观测路径设置, 观测目标的设计以及同步气象参数测量. 下面详细介绍这三个部分的具体方案.

3.2 成像系统与观测条件

气溶胶的影响在低能见度、较长传输距离以及系统具备较高空间分辨能力的条件下更为显著. 并且只有在低于气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的有效截止频率时才可以观测到气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 对空间频率的依赖

性. 因此, 成像系统需具备较高的截止频率, 以避免系统自身 MTF_{sys} 过早衰减而掩盖气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的变化规律.

基于上述考虑, 本研究选用一台制冷型长波红外相机作为观测设备, 选择窄视场进行观测以保证探测器的空间采样能力和具备较高的角空间分辨率, 以扩大可用于分析的气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 有效频率范围. 相机的主要参数列于表 1.

试验场景及观测路径示意如图 3 所示, 成像系统放置于合肥市科学岛大气光学实验场内建筑物三楼室内窗边的稳定平台上. 一方面, 室内稳定平台可有效减小风速作用下的机械抖动对成像稳定性的影响; 另一方面, 通过提高观测高度, 可削弱近地层大气湍流对成像过程的干扰, 从而使气溶胶散射效应在成像退化中占据主导地位. 使用两块刃边靶板进行观测, 其中远距离的靶板设置于约 1 km 距离处的建筑屋顶位置, 用于计算包含大气影响的系统 MTF_{total} . 该观测距离在保证靶标结构清晰可辨的同时, 使大气传输路径足够长, 从而增强气溶胶散射对成像调制传递特性的影响, 更有利于气溶胶效应在系统总 MTF_{total} 中体现. 近距离靶板设置于 100 m 观测距离处, 其大气影响可忽略不计, 用于计算系统自身 MTF_{sys} .

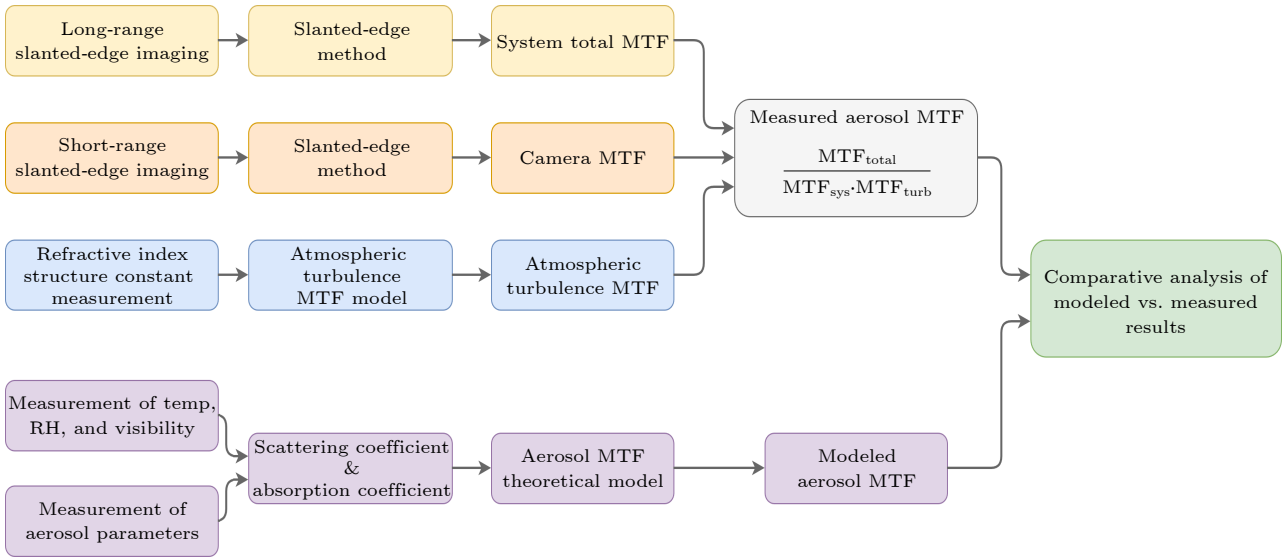


图 2 气溶胶 MTF 建模与测量方案

Fig. 2. Aerosol MTF modeling and measurement scheme.

表 1 长波红外相机参数

Table 1. Parameters of the long-wave infrared camera.

参数	波段范围/ μm	像元数	视场/($^{\circ}$)	焦距/mm	系统口径/mm	NETD/mK
数值	7.7—9.3	640×512	2.94×2.35	180	60	≤ 25

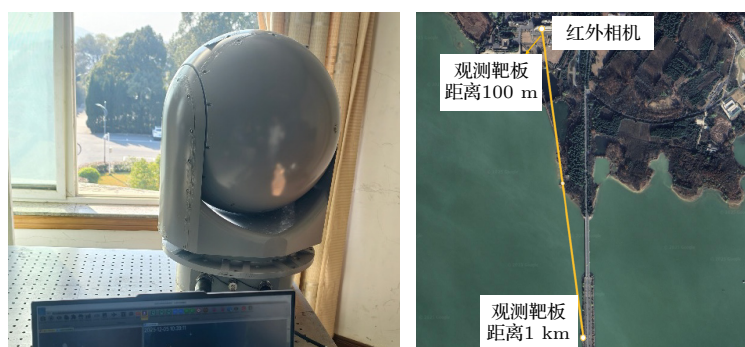


图3 试验场景与观测路径

Fig. 3. Experimental scene and observation path.

试验采用连续观测的方式获取长时间序列成像数据,以捕捉不同气象条件下气溶胶浓度变化对成像性能的影响,用于分析气溶胶散射效应随环境条件变化的动态特性,为后续气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的对比分析提供数据基础.

3.3 观测靶板

由于刃边靶板需要形成温差对比,采用了不同辐射特性的材料组合制作刃边两侧区域.其中,低温侧采用发射率较低的镜面铝板,在倾斜放置时能够有效反射天空辐射,从而在成像中形成相对低亮度区域;高温侧为高红外发射率的靶板,使该区域在相同环境条件下具有较高的辐射温度.通过上述材质组合,可在无需主动加热的情况下,在外场环境中获得稳定且对比度良好的红外刃边结构,满足 MTF 测量对信噪比和边缘清晰度的要求.

考虑到需要分别在不同距离下观测刃边靶板的图像,为保证不同观测条件下 MTF 结果具有可比性,近距离与远距离靶板采用相同材质,仅在几何尺寸上进行区分.为确保靶标的刃边在图像中具有足够的空间采样点数,根据长波红外相机的视场角和观测距离,以刃边像元数不小于 20 像元为原则,确定远距离观测采用的刃边靶板尺寸为

2.4 m×1.2 m, 近距离刃边靶板尺寸为 40 cm×40 cm. 试验中分别在近距离与远距离条件下对上述刃边靶板进行成像观测,对应的红外成像示例如图 4 所示.

3.4 同步环境参数测量

试验期间在观测区域附近布设了气象观测设备,以同步采集理论模型需要的气象参数,设备情况如图 5 所示.全要素自动气象站记录了环境温度、相对湿度,能见度仪用于观测能见度数据;CE318 太阳光度计用于反演气溶胶光学特性;QHTP-3 型温度脉动仪用于测量大气折射率结构常数,作为大气湍流 MTF 建模的输入参数,用于量化大气湍流对成像的影响.这些气象参数为后续分析气溶胶条件与实测 MTF 变化之间的关联关系提供数据依据.

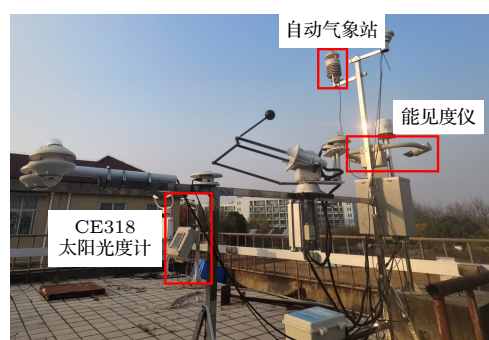


图5 同步气象参数观测设备

Fig. 5. Meteorological parameter measurement equipment.



图4 近距离和远距离观测的刃边靶板红外成像图

Fig. 4. Infrared images of the knife-edge target under near-range and long-range observations.

基于上述试验配置,采用长波红外相机分别对两组不同距离的靶板进行连续观测.试验开始前调整相机对焦确保靶板成像清晰,并保存参数设置,之后不再对相机参数做修改.同时,同步记录观测期间的气象参数,用于表征大气与气溶胶条件的变

化, 作为大气 MTF 理论模型的输入参数. 通过对不同观测距离、不同大气条件下获取的靶板图像进行统一处理与分析, 为后续气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 建模和计算及对比分析提供数据基础.

4 结果与讨论

2025 年 12 月 13 日至 12 月 22 日在合肥地区开展了连续外场观测试验, 获取了不同气溶胶条件下的刃边靶标红外成像数据及同步大气参数. 试验期间大气环境变化明显, 涵盖了低能见度污染天气与相对清洁天气等多种气溶胶浓度的条件, 为分析气溶胶散射对红外成像质量的影响提供了良好的数据基础. 在观测时段内, 12 月 17 日至 12 月 19 日合肥地区处于重度污染状态, 能见度显著降低; 其后若干观测时段能见度逐步回升, 代表了气溶胶影响相对较弱的情形. 在此基础上, 对实测红外图像进行 MTF 计算, 提取气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$, 并对不同气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 建模方法开展对比分析.

4.1 实测气溶胶 MTF 计算

为确保气溶胶 MTF 测量结果可以真实反映气溶胶散射对成像的影响, 同时减少其他因素干扰,

根据图 6 中的大气折射率结构常数 C_n^2 观测结果, 仅选择 C_n^2 较低的夜间及日出前时段进行分析, 以降低湍流随机性对测量结果的影响, 并对多帧刃边图像进行时间平均处理, 减弱探测器噪声和其他扰动.

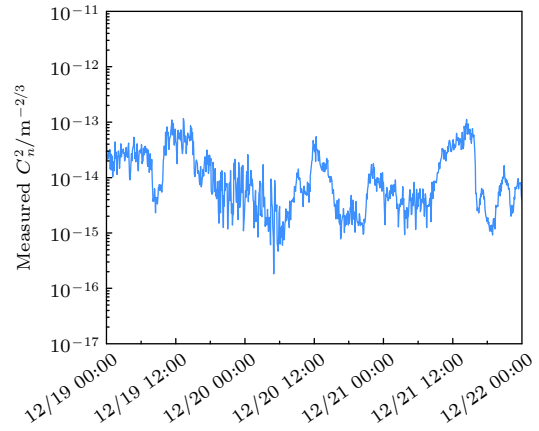


图 6 大气折射率结构常数测量结果

Fig. 6. Measurement of the atmospheric refractive index structure constant.

采用刃边法对筛选后的图像进行 MTF 计算, 其基本原理与处理流程如图 7 所示. 首先, 从实测红外图像中选取包含清晰高对比度刃边的局部区域, 并对刃边方向进行几何校正, 以保证刃边近似垂直于采样方向. 随后, 沿刃边法向方向进行

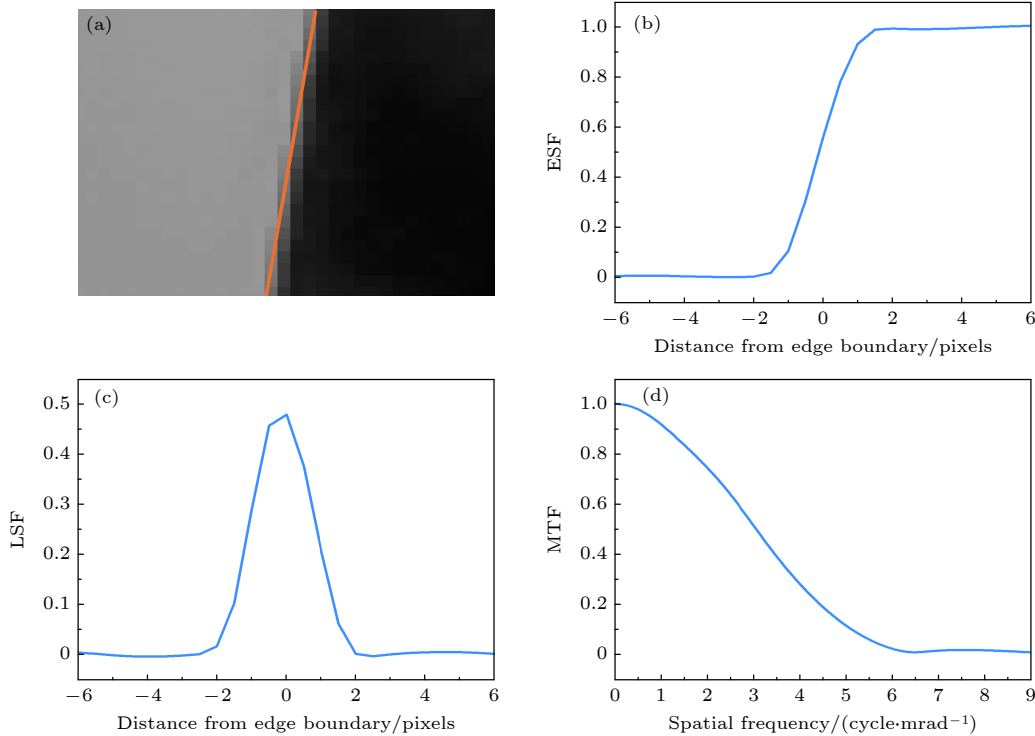


图 7 (a) 刃边区域图像; (b) ESF 计算结果; (c) LSF; (d) MTF

Fig. 7. (a) Edge region image; (b) ESF calculation result; (c) LSF; (d) MTF.

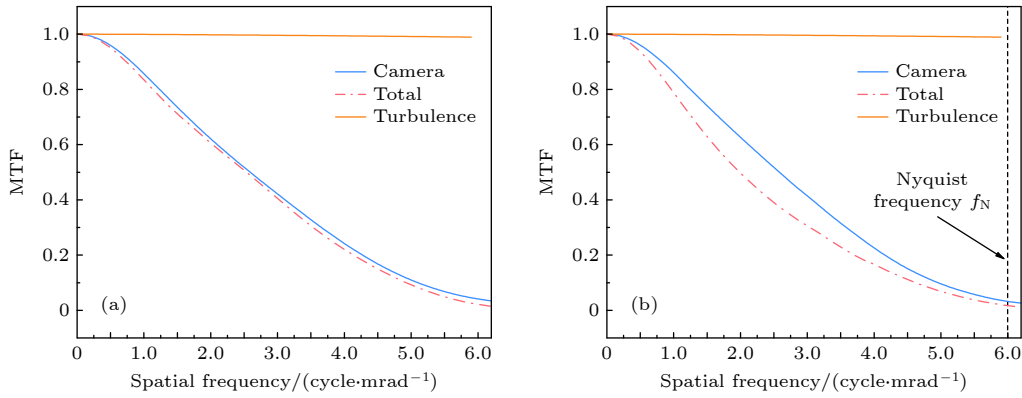


图 8 高能见度 (a) 和低能见度 (b) 条件下观测图像计算的各项 MTF

Fig. 8. MTF calculations for under high visibility (a) and low visibility (b) conditions.

亚像元级采样, 获取边缘扩展函数 (edge spread function, ESF). 为降低成像噪声及量化误差对微分运算的影响, 对 ESF 数据进行平滑处理后, 通过数值微分得到线扩展函数 (line spread function, LSF). 最终, 对归一化后的 LSF 进行傅里叶变换, 获得对应的调制传递函数. 上述 MTF 计算过程均基于 Imatest 专业图像质量分析软件完成, 该软件集成了成熟可靠的刃边 MTF 计算算法, 有效保证了 MTF 计算的一致性与准确性.

基于该方法, 分别对近距离观测图像和远距离观测图像进行了 MTF 计算. 计算结果用于后续分离和评估气溶胶对成像质量的影响.

图 8 给出了能见度为 22.9 和 1.43 km 条件下各项 MTF 的计算结果. 根据试验期间能见度数据范围, 本文选取能见度大于 20 km 的数据作为高能见度观测条件的代表, 而能见度低于 2 km 的数据作为低能见度典型观测条件, 因此图 8 数据包含高能见度与低能见度两类观测条件. 图 8 中所示的系统总 MTF_{total} 为远距离观测图像计算结果, 相机自身 MTF_{sys} 为近距离观测图像的计算结果, 湍流 MTF_{trub} 则由实测大气折射率结构常数结合理论模型得到. 由图 8 可以看出, 在能见度较高时, 系统总 MTF_{total} 与相机 MTF_{sys} 基本一致, 且湍流 MTF_{trub} 在整个空间频率范围内都接近于 1, 表明此时大气对成像系统空间频率响应的影响较弱. 当能见度较低时, 系统总 MTF_{total} 出现明显衰减, 而湍流 MTF_{trub} 仍接近于 1, 说明图像质量退化主要由气溶胶散射效应引起.

图 9 给出了高能见度条件下, 基于近距离与远距离观测图像计算的多个时刻的 MTF. 在该能见度条件下, 气溶胶散射及大气湍流对成像质量的影

响均可认为较弱, 成像退化主要由成像系统自身特性所主导. 根据图 9 中不同时刻的近距离与远距离 MTF 对比结果发现, 在大气影响很小的情况下, 系统自身的 MTF 仍存在波动. 根据图 8 的 MTF 计算结果, 在系统有效空间频率范围内, 中频区域的 MTF 变化最为明显, 能够较为敏感地反映气溶胶对成像质量的影响特征. 因此, 选取 0.5 倍奈奎斯特频率 f_N 作为代表性的空间频率点进行分析. 计算 $0.5f_N$ 处近距离与远距离 MTF 的比值, 在不同观测时刻下其波动范围处于 1.06—1.07 之间. 可取波动范围内的平均值 k_c 作为相机 MTF 的修正系数, 对实测气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 修正, 从而减弱成像系统状态变化对实测结果的影响.

在此基础上, 通过 (8) 式从系统总 MTF_{total} 中剔除相机自身 MTF_{sys} 与湍流 MTF_{trub} 的影响, 可进一步提取气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 分项, 用以表征气溶胶条件变化对红外成像调制传递特性的影响.

4.2 气溶胶 MTF 理论建模

根据气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 理论模型, 其主要输入参数包括气溶胶散射系数、吸收系数以及气溶胶截止频率等. 其中, 散射与吸收系数表征了气溶胶对辐射传输过程的衰减作用, 是气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 计算的关键参数. 本文分别基于模式气溶胶参数和实测气溶胶参数计算得到的散射系数与吸收系数, 进行气溶胶 MTF 的理论建模分析.

4.2.1 基于气溶胶模式的建模结果

首先基于 MODTRAN 辐射传输软件对大气透过率进行模拟计算, 并据此推导气溶胶散射系数与吸收系数. 结合试验区域的环境参数, 在模型中

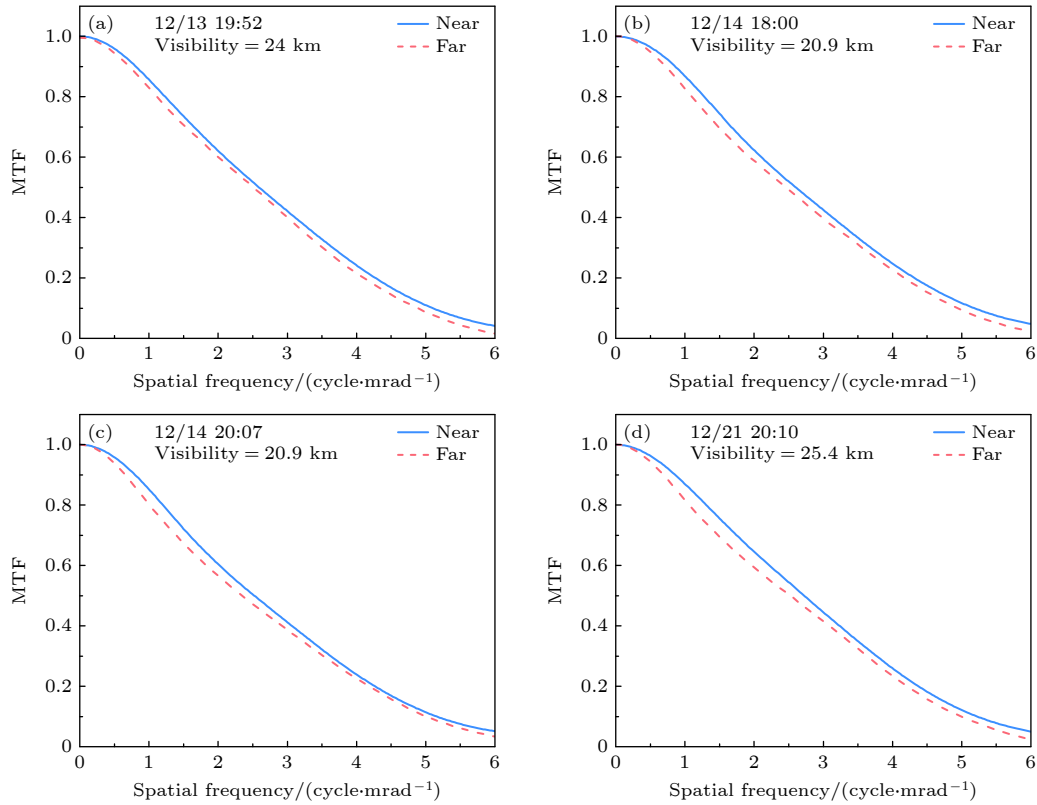


图 9 高能见度条件下, 基于近距离和远距离观测图像得到的 MTF

Fig. 9. MTF obtained from near-range and long-range images under high visibility conditions.

输入实测的空气温度和相对湿度等气象参数, 观测高度设为 6 m, 水平观测路径长度为 1 km, 气溶胶模式选用城市型, 能见度参数按实测值进行设置.

在上述参数条件下, MODTRAN 可输出红外波段内多种透过率的结果, 包括总透过率、气溶胶消光透过率以及气溶胶吸收透过率. 其中, 总透过率反映了分子吸收、气溶胶散射及吸收等多种大气作用的综合影响; 气溶胶消光透过率表征气溶胶散射与吸收共同引起的辐射衰减; 气溶胶吸收透过率则仅考虑气溶胶吸收作用对辐射传输的影响. 图 10 给出了上述各类透过率的计算结果.

由于气溶胶消光作用可视为散射与吸收效应的共同结果, 气溶胶散射透过率可通过气溶胶消光透过率 (trans. aerosols) 与气溶胶吸收透过率 (absorptance aerosols) 之比获得,

$$\tau_{\text{sca}} = \tau_{\text{ext}} / \tau_{\text{abs}}. \quad (9)$$

在获得不同作用机制对应的透过率后, 可基于比尔-朗伯定律进一步计算气溶胶的光学系数. 对于传输距离为 R 的均匀介质路径, 总消光系数可表示为

$$\sigma = -\ln(\tau) / R, \quad (10)$$

式中, σ 表示消光系数; 当 τ 分别代入总透过率和气溶胶散射透过率时, 根据该公式可以计算出观测路径上的平均总消光系数和散射系数. 其中总消光系数可以表示为吸收系数和散射系数之和:

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{abs}} + \sigma_{\text{sca}}. \quad (11)$$

结合上述公式计算给定观测条件下的气溶胶散射与吸收系数, 作为气溶胶 $\text{MTF}_{\text{aerosol}}$ 理论模型的输入参数.

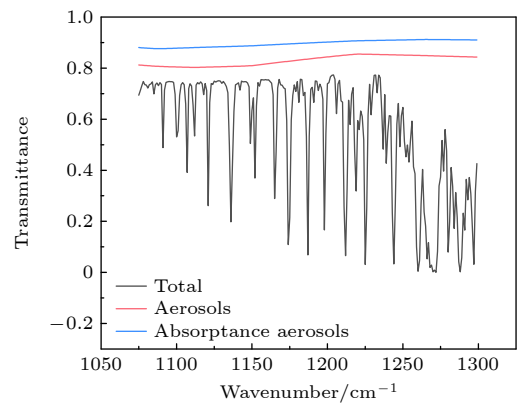


图 10 MODTRAN 计算得到的不同气溶胶相关透过率分量

Fig. 10. Transmittance components for different aerosols calculated using MODTRAN.

图 11 给出了在 $0.5f_N$ 处, 基于能见度并采用城市型气溶胶模式计算得到的气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 与实测气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 随能见度变化的对比结果.

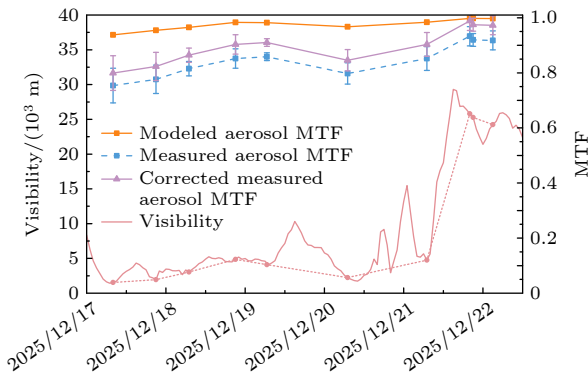


图 11 0.5 倍奈奎斯特频率处的实测和建模气溶胶 MTF 与能见度对比

Fig. 11. Measured and modeled aerosol MTF at $0.5 \times$ Nyquist frequency compared with visibility.

整体来看, 气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 与能见度变化呈现出较为明确的相关性: 随着能见度降低, 气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 逐渐减小, 表明气溶胶散射增强会导致系统中频段空间频率响应明显退化; 而在能见度较高时, 气溶胶散射作用较弱, 其对成像质量的影响有限, 气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 接近于 1.

进一步对比建模结果与修正后的实测结果可以发现, 在低能见度条件下, 建模得到的气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 整体高于实测值, 且偏差随能见度降低而增大. 上述结果表明, 仅基于典型城市型气溶胶模式并结合能见度参数进行建模, 难以准确描述试验区域的实际气溶胶特性.

4.2.2 基于实测气溶胶参数的建模结果

在采用 MODTRAN 进行辐射传输计算时, 用的是典型气溶胶模式, 其组分比例与实际观测环境可能存在差异. 本试验场地位于水库附近, 若直接采用城市型气溶胶模式, 难以准确反映真实气溶胶光学特性. 因此, 有必要结合实测数据对气溶胶组成进行修正.

本文用 CE318 型太阳光度计在试验期间获取的多波段气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth,

AOD) 数据, 在 OPAC (optical properties of aerosols and clouds) 模型提供的典型气溶胶组分参数^[32]基础上, 结合米氏散射理论计算各组分在不同波长下的消光贡献, 并构建由各组分体积占比加权叠加的气溶胶光学厚度正向模型. 通过优化反演, 使模型计算得到的 AOD 与实测 AOD 相匹配, 从而确定各气溶胶组分的体积占比. 图 12 为观测的 AOD 数据和根据推导的气溶胶组成模拟的 AOD 数据, 推导的气溶胶组成在表 2 中给出.

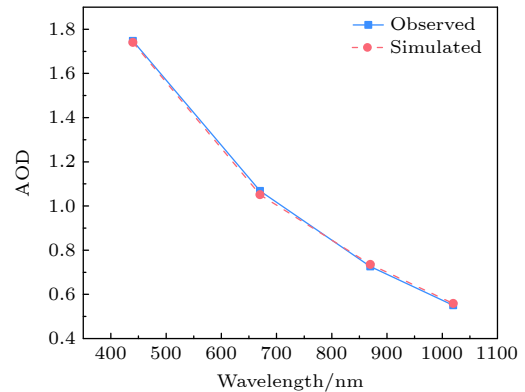


图 12 观测的 AOD 与由推导的气溶胶组成模拟的 AOD

Fig. 12. Observed AOD and AOD simulated from derived aerosol composition.

表 2 的数据对应了 12 月 17 日早上 7:00 的观测结果, 当时相对湿度为 90%, 能见度为 1.4 km. 根据表中的组分比例, 在 OPAC 中设置相应气溶胶成分及其含量, 并将相对湿度设为观测值, 在保持各组分比例不变的条件下调整粒子数浓度, 使计算能见度与实测值一致. 计算得到该时刻散射系数为 0.425, 吸收系数为 0.705. 采用相同流程对其他观测时刻的数据进行处理, 获得对应条件下的气溶胶散射和吸收参数, 并将其作为输入重新计算气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的理论值.

基于上述方法改进了气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 的理论建模结果, 并对实测气溶胶 $MTF_{aerosol}$ 进行了修正, 图 13 给出了改进后的对比结果. 由图 13 可以看出, 基于推导的气溶胶组成进行建模后, 模型结果在低能见度条件下与实测结果的符合程度明显提高, 得到两者之间的均方误差平均值相差 1.8%.

表 2 基于观测 AOD 数据推导的主要气溶胶组成

Table 2. Major aerosol components derived from observed AOD data.

气溶胶组分	Insoluble	Mineral transported	Mineral nuclei	Mineral accumulation	Mineral coarse
比例/%	26.62	22.38	19.58	16.72	13.57

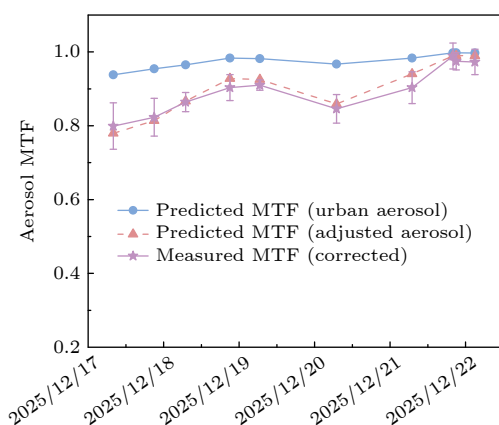


图 13 修正后的实测气溶胶 MTF 与预测 MTF 对比

Fig. 13. Comparison of corrected measured aerosol MTF and predicted MTF.

5 结 论

本文围绕气溶胶散射对长波红外成像模糊的影响,开展了理论建模与外场实测相结合的研究.试验结果表明,气溶胶散射会引入与空间频率相关的成像模糊,且 MTF 衰减程度随能见度降低而增强.基于 MODTRAN 中典型城市气溶胶模式计算气溶胶散射与吸收系数,并据此得到的气溶胶影响理论值与实测结果存在明显差异.为此,根据实测气溶胶光学厚度数据推导实际气溶胶组成,重新计算相关参数,并修正对焦差异引起的相机 MTF 偏差,从而提高了理论建模与实测结果的一致性,其均方误差平均值为 1.8%.研究结果为气溶胶影响建模及成像质量的量化评价提供了方法参考.

后续研究将增强气溶胶物理与光学参数的现场测量能力,以获取更多关键观测数据,从而提升气溶胶影响建模的精度与可靠性.

参考文献

- [1] Kou R, Wang C, Fu Q, Zhang J, Huang F 2023 *Appl. Opt.* **62** 398
- [2] Wang Y L 2024 *Chin. Sci. Technol. Inf.* **2024** 121 (in Chinese) [王亚莉 2024 中国科技信息 **2024** 121]
- [3] Wu H Y, Wang Z Y, Huang X J, Zhang Y, Shi X N, Zhang Y F 2022 *Infrared Technol.* **44** 151 [吴辉阳, 王泽洋, 黄兴军, 张艳, 石孝楠, 张云飞 2022 红外技术 **44** 151]
- [4] Melamed R, Yitzhaky Y, Kopeika N, Rotman S 1998 *Opt.*

- Eng.* **37** 1902
- [5] Watkins W, Dutro R 1994 *Opt. Eng.* **33** 2588
- [6] Kopeika N, Rotman S, Taig I, Vander A 2003 *Opt. Eng.* **42** 534
- [7] Butrimas S, Driggers R, Holst G, Kopeika N, Zilberman A 2020 *Opt. Eng.* **59** 073103
- [8] Zardecki A, Gerstl S A W, Tam W G, Embury J F 1986 *J. Opt. Soc. Am. A* **3** 393
- [9] Zardecki A, Gerstl S A W, Embury J F 1984 *Appl. Opt.* **23** 4124
- [10] Yura H T 1971 *Appl. Opt.* **10** 114
- [11] Lutomirski R F 1978 *Appl. Opt.* **17** 3915
- [12] Ishimaru A 1978 *Appl. Opt.* **17** 348
- [13] Bruscaglioni P, Donelli P, Ismaelli A, Zaccanti G 1991 *J. Mod. Opt.* **38** 129
- [14] Valley M 1992 *Proceedings of the Atmospheric Propagation and Remote Sensing* Orlando, FL, United States, August 1, 1992 p1688
- [15] Kuga Y, Ishimaru A 1985 *J. Opt. Soc. Am. A* **2** 2330
- [16] Sadot D, Kopeika N S 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 172
- [17] Dror I, Kopeika N S 1992 *Opt. Lett.* **17** 1532
- [18] Dror I, Kopeika N S 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 970
- [19] Kopeika N, Zilberman A, Yitzhaky Y 2014 *Proceedings of the Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV* Baltimore, MD, United States, May 29, 2014 p907119
- [20] Colombi J, Louedec K 2013 *J. Opt. Soc. Am. A* **30** 2244
- [21] Hanafy M E, Roggemann M C, Guney D O 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 1312
- [22] LeMaster D, Eismann M 2012 *Proceedings of the Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXIII* Baltimore, MD, United States, May 18, 2012 p83550
- [23] Eismann M, LeMaster D 2013 *Opt. Eng.* **52** 046201
- [24] Hanafy M, Roggemann M, Guney D 2015 *Opt. Eng.* **54** 033101
- [25] Packard C, Shaw R, Cantrell W, Kinney G, Roggeman M, Valenzuela J 2018 *J. Appl. Remote Sens.* **12** 042404
- [26] Butrimas S, Driggers R, Richardson K, Holst G 2019 *Proceedings of the Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXX* Baltimore, MD, United States, May 14, 2019 p1100114
- [27] Byrd P, Goertzen A, Bose-Pillai S, Keefer K, Fiorino S, Wilson B 2024 *Proceedings of the Unconventional Imaging, Sensing, and Adaptive Optics 2024* San Diego, CA, United States, October 7, 2024 p131491C-1
- [28] Goertzen A, Johnson E, Bui A, Bose-Pillai S, Keefer K, Fiorino S 2025 *Proceedings of the Unconventional Imaging, Sensing, and Adaptive Optics 2025* San Diego, CA, United States, September 18, 2025 p136190B-1
- [29] Bhandari A, Hamre B, Frette O, Stamnes K, Stamnes J J 2011 *Opt. Express* **19** 14549
- [30] Cheng C, Shi Z L, Cui S C, Xu Q S 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 180201 (in Chinese) [程晨, 史泽林, 崔生成, 徐青山 2017 物理学报 **66** 180201]
- [31] Sadot D, Kopeika N S 1994 *Appl. Opt.* **33** 7107
- [32] Hess M, Koepke P, Schult I 1998 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **79** 831

Measurement and modeling of aerosol scattering effects on long-wave infrared imaging systems*

XIAHOU Qi¹⁾²⁾³⁾ XIONG Wei^{1)2)3)†} WU Jun^{1)2)3)‡} LI Dacheng¹⁾²⁾³⁾CUI Fangxiao¹⁾³⁾ CHENG Chen¹⁾³⁾1) (*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)3) (*Anhui Provincial Key Laboratory of Optical Quantitative Remote Sensing, Hefei 230031, China*)

(Received 4 March 2026; revised manuscript received 13 March 2026)

Abstract

Aerosol scattering alters the propagation path of infrared radiation in the atmosphere, causing part of the radiative energy to be redirected and dispersed. This results in attenuation and spatial spreading of the received radiation signal. Consequently, it reduces image contrast and blurs fine details, making aerosol scattering a primary contributor to infrared image degradation. Although the impact of aerosol scattering on imaging has been demonstrated theoretically in previous studies, the extent of its contribution to image degradation in practical scenarios remains controversial. Two main factors contribute to this controversy. First, there is a strong coupling between atmospheric transmission effects and the imaging system's response characteristics. Second, it is difficult to accurately obtain atmospheric environmental parameters. As a result, systematic comparisons and validations between theoretical modeling and field measurements remain limited.

To address these issues, we employed the modulation transfer function (MTF) as a quantitative metric for image quality. Accordingly, we developed an integrated framework combining theoretical modeling and field measurements to analyze the impact of aerosol scattering. A field imaging experimental system was established to acquire target image data along with synchronous meteorological observations. Based on these data, the contributions of system response, atmospheric turbulence, and aerosol scattering were quantified and modeled. For aerosol scattering modeling, scattering and absorption coefficients were first calculated using the MODTRAN urban aerosol model to construct a theoretical aerosol MTF model. However, significant discrepancies were observed between the modeled results and field measurements. To improve modeling accuracy, aerosol optical properties retrieved from CE318 sun photometer observations were further incorporated into the simulation. Furthermore, deviations caused by variations in the imaging system's focus were considered, and the measured aerosol MTF was corrected accordingly, improving the reliability of the experimental results.

The results demonstrate that under low-visibility conditions, aerosol scattering has a significant impact on the modulation transfer characteristics of long-wave infrared imaging systems. The aerosol MTF predicted using CE318-retrieved parameters shows good agreement with experimental measurements, achieving a mean square error of only 1.8%, which significantly outperforms the results based on standard aerosol models. By integrating theoretical modeling with field measurements, this study quantitatively analyzes and experimentally validates the effects of aerosol scattering. These findings reveal the underlying mechanisms of infrared image degradation and ultimately provide a reliable basis for performance prediction and model refinement of infrared imaging systems in complex atmospheric environments.

Keywords: aerosol, scattering, image blur, modulation transfer function

DOI: [10.7498/aps.75.20260313](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260313)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260313](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260313)

* Project supported by the National High-resolution Earth Observation System Project, China (Grant No. 52-L10D01-0613-20/22) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42105082).

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

‡ Corresponding author. E-mail: wujun@aiofm.ac.cn

气溶胶散射对长波红外成像系统影响的测量与建模

夏侯琪 熊伟 吴军 李大成 崔方晓 程晨

Measurement and modeling of aerosol scattering effects on long-wave infrared imaging systems

XIAHOU Qi XIONG Wei WU Jun LI Dacheng CUI Fangxiao CHENG Chen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 140401 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260313

CSTR: 32037.14.aps.75.20260313

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260313>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

计算偏振彩色傅里叶叠层成像: 散射光场偏振特性的复用技术

Computational polarized colorful Fourier ptychography imaging: a novel information reuse technique of polarization of scattering light field

物理学报. 2024, 73(12): 124202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240268>

一种基于毛细管X光透镜的微型锥束CT扫描仪

Micro cone-beam CT scanner based on X-ray polycapillary optics

物理学报. 2022, 71(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212195>

变掺杂变组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 反射式光电阴极分辨力特性

Resolution characteristics of varying doping and varying composition $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ reflective photocathodes

物理学报. 2022, 71(15): 157901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220244>

高能带电粒子束对陡峭密度梯度区照相的散射效应解析模型

Analytical model for scattering effect of energetic charged-particle beam in radiography of steep density gradient region

物理学报. 2022, 71(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212269>

基于双层多指标优化的水下偏振成像技术

Underwater polarization imaging based on two-layer multi-index optimization

物理学报. 2023, 72(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222017>

真空光悬浮非球形微粒散射场偏振特性

Polarization characteristics of the scattered field for a nonspherical particles optically levitated in vacuum

物理学报. 2026, 75(10): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260117>