

光学学报

基于表观调制传递函数光谱特征的成像谱段优选方法

樊子钊^{1,2}, 武鹏飞^{2,3*}, 饶瑞中^{1,2,3}

¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230022;

²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中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

³先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 基于混浊大气表观调制传递函数的光谱特征, 提出一个新的成像质量评价因子作为波段优选的依据, 得到了不同波段的成像效果。同时分析了优选波段的影响因素, 给出了典型大气条件、典型带宽下的成像优选波段, 即在 1036~1046 nm、1620~1630 nm 波段可得到典型区域相对普适的、良好的成像质量。最后通过成像实验对优选方法的有效性进行了初步验证。

关键词 光谱学; 调制传递函数; 混浊介质中的成像; 图像质量分析

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2430003

Selection of Optimal Imaging Band Based on Spectral Characteristics of Apparent Modulation Transfer Function

Fan Zizhao^{1,2}, Wu Pengfei^{2,3*}, Rao Ruizhong^{1,2,3}

¹School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, Anhui, China;

²Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

³Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

Abstract According to spectral characteristics of apparent modulation transfer function (MTF) of turbid atmosphere, this paper proposes a new imaging quality evaluation factor to select optimal bands and obtains the imaging quality in different bands. Furthermore, the paper analyzes factors affecting optimal bands and summarizes optimal bands under typical atmospheric conditions and typical bandwidths. It is found that relatively universal and favorable images can be obtained in the bands of 1036–1046 nm and 1620–1630 nm. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by imaging experiments.

Key words spectroscopy; modulation transfer function; imaging through turbid media; image quality analysis

1 引言

光在大气中传输时会受到大气中分子与气溶胶粒子的吸收和散射作用, 导致接收到的图像对比度下降, 造成图像模糊^[1]。同时, 背景光经过大气传输叠加到整幅图像上, 也会使得图像的对比度降低^[2]。调制传递函数(MTF)可以从空间频域定量描述图像质量下降的程度, 因此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。

近几十年来, 许多学者对混浊大气 MTF 进行了分析, 建立了多种 MTF 的物理模型, MTF 物理模型大多基于小角散射近似模型^[3-8], 并在目标识别影响分析方面得到了一些应用^[9-11], 其在低频段具有较高的精度, 然而在高频段误差较大。混浊介质 MTF 等效^[12-13]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, 可以得到全

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-05-04; 录用日期: 2022-05-27

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(2022450)

通信作者: *wupengfei@aiofm.ac.cn

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。此外, 近期提出的表观 MTF 综合考虑了混浊大气 MTF 和背景辐射引起的零频分量对图像大气传输的影响^[2]。

表观 MTF 与波长相关, 这说明不同波段的成像效果存在差异, 目前已有的成像波段优选方法^[14-16]并未涉及 MTF, 因此从空间频域建立的成像波段优选方法将为实现高质量成像和高精度目标探测识别提供一种创新性的视角和方法。

本文基于混浊大气中图像退化的光学模型, 利用混浊大气表观 MTF 的光谱特征, 提出一个新的成像质量评价因子作为波段优选的依据, 得出不同波段的成像效果。本文研究相比于以往的研究更加具体, 可以对不同波段的成像质量进行定量化比较, 同时分析了优选波段的影响因素, 给出典型大气条件、典型带宽下的成像优选波段。最后, 通过实际成像实验和成像质量评价分析对波段优选方法进行了初步验证。

2 表观调制传递函数模型

目标图像经过混浊大气传输时会受到大气分子和气溶胶粒子的影响, 导致接收到的图像质量下降, 这主要体现在 3 个方面: 1) 大气分子和气溶胶粒子的吸收和散射造成目标像元固有亮度的衰减; 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(含太阳直射光、大气漫射光、地表反射光)经过大气分子和气溶胶粒子的散射后叠加到接收到的图像上, 造成图像整体对比度下降^[2]。

整个图像退化过程可以表示为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \otimes P_{SF}(\lambda) + I_p(\lambda), \quad (1)$$

式中: $I(\lambda)$ 为接收到的图像亮度; I_0 为目标像元亮度; P_{SF} 为混浊大气点扩散函数; I_p 为环境光经过混浊大气散射后传输至接收位置的背景光。式(1)等号右边第一项即目标像元亮度 I_0 和混浊大气点扩散函数 P_{SF} 的卷积表征目标像元固有亮度的衰减和邻近像元多次散射光叠加造成的模糊, 第二项 I_p 表征环境光经过混浊大气散射后传输至接收位置的背景光^[2]。

将式(1)进行傅里叶变换, 得到

$$F(\Omega, \lambda) = F_0(\Omega, \lambda) \times \left[M_{TF}(\Omega, \lambda) + \frac{I_p(\lambda)}{F_0(\Omega, \lambda)} \delta(\lambda) \right], \quad (2)$$

式中: Ω 为空间频率; $F(\Omega, \lambda)$ 为 $I(\lambda)$ 的傅里叶变换; M_{TF} 为调制传递函数; $F_0(\Omega, \lambda)$ 为 $I_0(\lambda)$ 的傅里叶变换; $\delta(\lambda)$ 为狄拉克函数。式(2)从空间频域的角度表明, 混浊大气对图像空间频谱的影响可采用表观调制传递函数完整描述, 其包括两部分。

1) 混浊大气调制传递函数 MTF 对图像频谱分量的影响可根据混浊介质 MTF 等效原理计算得到, 即混浊介质的 MTF 等同于在无穷远处各向同性漫射光照射下混浊介质在无穷远处的出射光强度分布 I :

$$M_{TF}(\Omega) = I(\theta), \quad (3)$$

式中: θ 为出射光的极角。通过等效原理将 MTF 的计

算转换为对出射光场的求解, 这可以通过辐射大气传输算法^[17]实现。输入参数主要包括混浊大气的光学厚度、单次散射反照率和非对称因子。

混浊大气包括分子和气溶胶粒子, 在分析对图像传输的影响时, 将两者看作相互独立的, 则混浊大气总的 MTF 可以表示为两者 MTF 的乘积, 即

$$M_{TF} = M_m \times M_a, \quad (4)$$

式中: M_m 和 M_a 分别代表大气分子和气溶胶粒子的 MTF。

因此, 可通过分别计算大气分子和气溶胶粒子的 MTF, 得到混浊大气总的 MTF。

$$2) \frac{I_p(\lambda)}{F_0(\Omega, \lambda)} \delta(\lambda) \text{ 表征混浊大气散射环境光对图像}$$

零频率分量的影响, 其对图像整体的对比度有明显影响。

当目标仅被大气背景光照明时, 满足以下表达式^[18]:

$$\frac{I_p(\lambda)}{F_0(\Omega, \lambda)} \times \delta(\lambda) = \frac{1 - T(\lambda)}{kr_m(\lambda)}, \quad (5)$$

式中: r_m 为目标最大表面反射率; k 为与目标零频率分量有关的参量; T 是大气透过率。

3 成像波段优选方法

依据表观调制传递函数模型, 可分别计算得到大气分子和气溶胶粒子的表观调制传递函数, 进而可分析其光谱特征。图 1 给出几种典型波长下的 MTF 曲线。具体仿真计算条件是: 大气能见度为 10 km, 图像水平传播距离为 1 km。此外, 分子的非对称因子取为 1, 吸收系数 $\beta_{m,abs}$ 和消光系数 $\beta_{m,ext}$ 通过逐线积分(LBL)算法^[19]计算得到, 光学厚度和单次散射反照率则分别可表示为

$$\tau_m = \beta_{m,ext} L, \quad (6)$$

$$\omega_m = (\beta_{m,ext} - \beta_{m,abs}) / \beta_{m,ext}. \quad (7)$$

气溶胶粒子的非对称因子、单次散射反照率和消光系数来自大气光学特性参数数据库, 光学厚度则根据式(6)计算得到, 式中分子消光系数采用气溶胶消光系数代替。

从图 1 中可以看出: 不同波长下的大气分子和气溶胶粒子 MTF 均存在明显差异, 尤其是分子吸收波长和非吸收波长之间, 混浊大气总的 MTF 也体现出了这种差异。这说明混浊大气中不同波长的成像效果是不同的, 基于该差异性可以进行成像波段的优选。

在大气相关参数确定的情况下, M_{TF} 为波长 λ 和空间频率 Ω 的函数。为了定量表征不同波段的成像效果, 首先对各个波长计算得出其对应的平均调制传递函数 \bar{M}_{TF} :

$$\bar{M}_{TF} = \int M_{TF} d\Omega / \int d\Omega, \quad (8)$$

\bar{M}_{TF} 越大表示该波长的目标空间频谱信息含量越多。依据式(8)对 MTF 曲线进行积分, 空间频谱的积分区间取为 $[0, 1000]$, 得到 \bar{M}_{TF} 的曲线如图 2 所示。

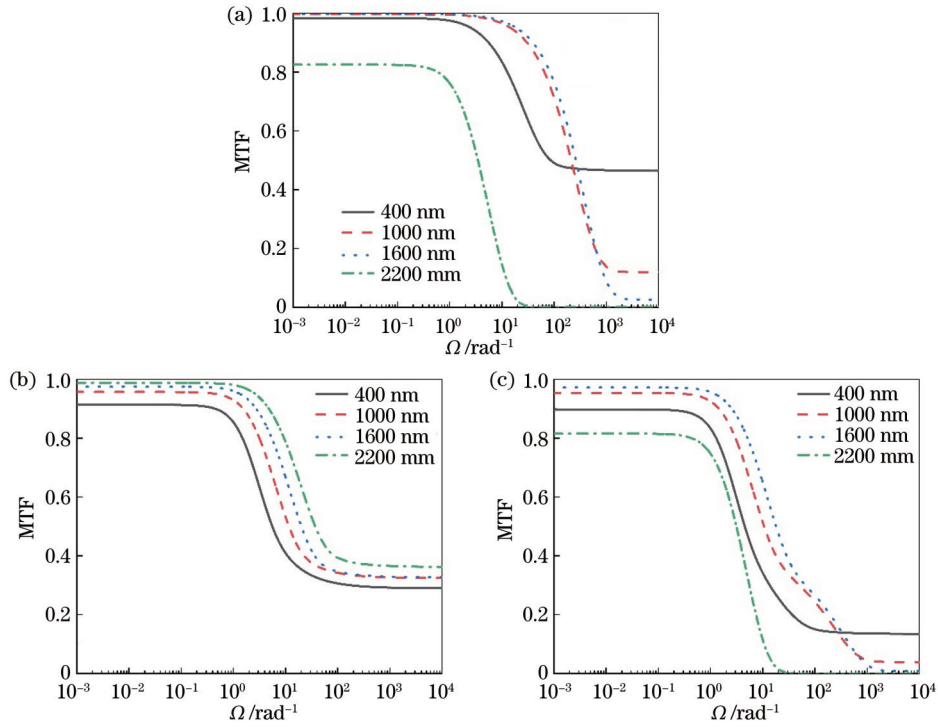


图 1 MTF 曲线。(a)分子;(b)气溶胶粒子;(c)混浊大气
Fig. 1 MTF curves. (a) Molecule; (b) aerosol; (c) turbid atmosphere

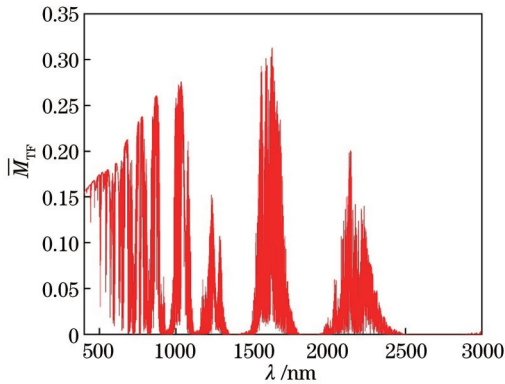


图 2 \bar{M}_{TF} 的光谱特征
Fig. 2 Spectral characteristic of \bar{M}_{TF}

同时,依据式(5)计算得到背景光贡献的表观调制传递函数零频率分量 $M'_{TF}(0)$,如图 3 所示,其中 kr_m 取

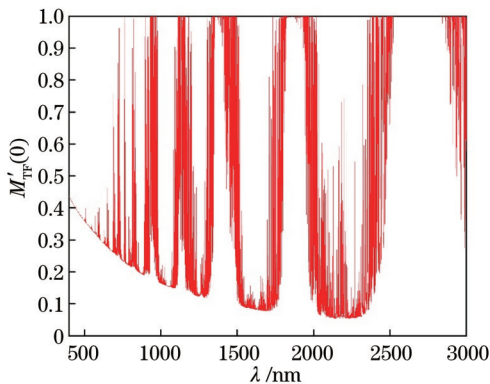


图 3 $M'_{TF}(0)$ 的光谱特征
Fig. 3 Spectral characteristic of $M'_{TF}(0)$

1, 大气透过率依据 $T = \exp[-(\tau_m + \tau_a)]$ 计算得到。 $M'_{TF}(0)$ 越大则表征该波长背景光的影响越大,成像效果越差。

针对表观调制传递函数,平均调制传递函数 \bar{M}_{TF} 越大则成像质量越好,而背景光贡献的零频率分量 $M'_{TF}(0)$ 越小则成像质量越好,因此综合两者给出成像波段优选的方法。用成像质量评价因子 Q_m 表征成像质量的优劣,其定义为

$$Q_m = \frac{\bar{M}_{TF}}{\bar{M}_{TF} + M'_{TF}(0)} \quad (9)$$

结合图 2 和图 3 给出的 \bar{M}_{TF} 曲线和 $M'_{TF}(0)$ 曲线,计算得到对应条件下 Q_m 的光谱特征如图 4 所示。可以看到,评价因子综合考虑了包括背景光影响在内的大气综合影响,可有效反映出实际大气中成像质量随波长的变化。

图 4 给出的仅仅是不同单波长的成像效果,然而实际的成像系统是对某一波段进行成像,为了定量表征该波段的成像效果,定义波段平均质量评价因子 \bar{Q}_m 可表示为

$$\bar{Q}_m = \int Q_m d\lambda / \int d\lambda \quad (10)$$

\bar{Q}_m 越大则成像质量越好。

将整个成像波段作为积分区间即可得出该波段的平均质量评价因子,以表征特定波段的成像效果,图 5 给出带宽为 30 nm 时 \bar{Q}_m 的光谱特征。

综上所述,特定波段的成像质量评价因子计算流程图如图 6 所示。

在以往研究中,图像大气传输的衰减效应通常可

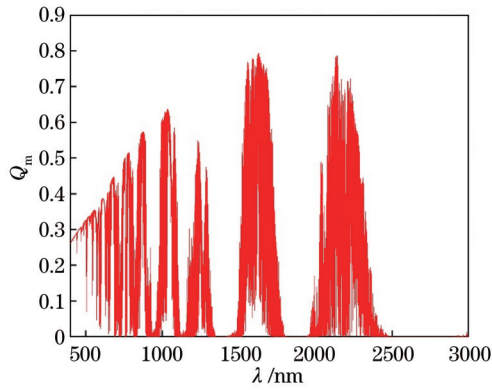


图 4 Q_m 的光谱特征

Fig. 4 Spectral characteristic of Q_m

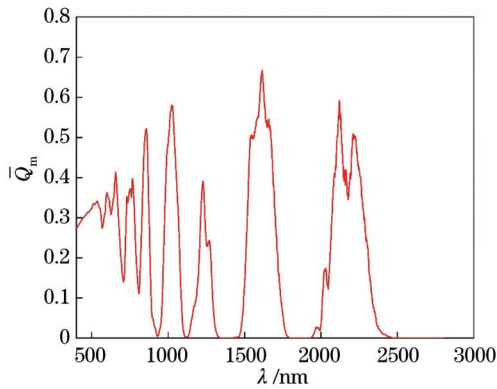


图 5 \bar{Q}_m 的光谱特征

Fig. 5 Spectral characteristic of \bar{Q}_m

直观表征图像成像效果^[20-21]。此处将上述波段优选方

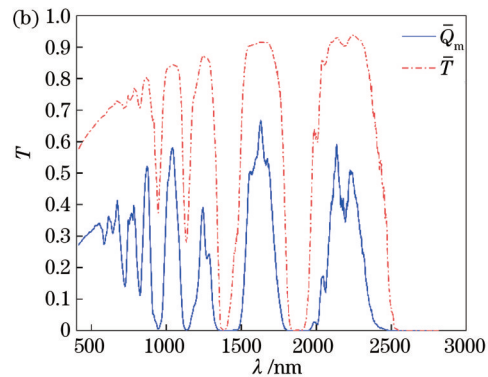
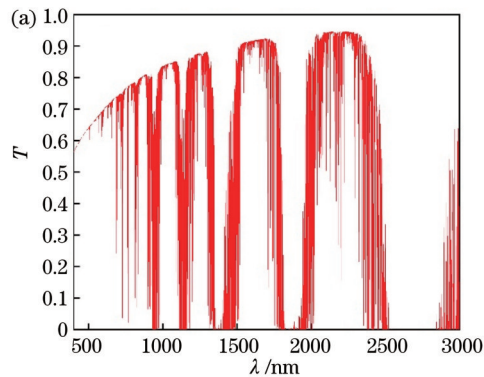


图 7 两种方法的优选波段对比。(a)大气透过率曲线;(b)波段带宽为 30 nm 时平均大气透过率 \bar{T} 和 \bar{Q}_m 的光谱特征对比

Fig. 7 Comparison of optimal bands of two methods. (a) Atmospheric transmittance curve; (b) spectral characteristics of average atmospheric transmittance and \bar{Q}_m over a bandwidth of 30 nm

4 优选波段的影响因素分析

多波段相机和高光谱相机等不同成像探测器的成像波段带宽是不同的;此外,不同地区的大气条件也存在一定差异。考虑实际应用,下面将重点分析波段带宽和气溶胶类型对优选波段的影响。

4.1 波段带宽

为了研究不同波段带宽下的最优波段是否相同,每间隔 1 nm 选择一个积分初始波长,进而给出乡村型

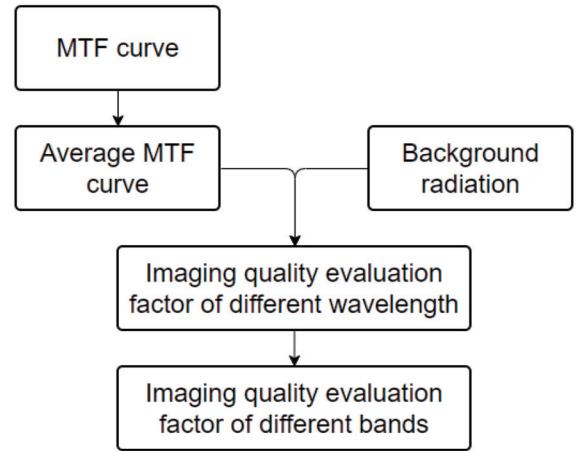


图 6 成像质量评价因子计算流程

Fig. 6 Flow chart of imaging quality evaluation factor calculation

法与根据大气透过率获得的波段进行对比,观察两者的差异性。图 7 给出大气透过率的光谱特征以及波段带宽为 30 nm 时平均大气透过率和平均质量评价因子的光谱特征对比。

通过对比可以看出:两种方法反映的优选波段分布存在一定差异,这是由于大气透过率的分析是从空域进行的,仅考虑大气的衰减效应,没有考虑邻近像元散射光和散射背景光的叠加导致的成像对比度下降,而表观调制传递函数的分析是从空间频域角度进行,考虑了混浊大气综合效应影响,得到的优选波段更能反映实际大气中的成像效果。

气溶胶条件下典型带宽下 \bar{Q}_m 的光谱特征对比情况,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,不同带宽下的成像优选波段不同,但存在交叠的波段范围。表 1 给出每种带宽下成像质量较好的 4 种波段,其中:在 1036~1046 nm、1620~1630 nm 和 2137~2147 nm 波段,4 种典型带宽下的成像效果较好;在 865~875 nm 波段,10 nm 和 30 nm 带宽的成像效果较好;在 2208~2268 nm 波段,60 nm 和 90 nm 带宽的成像效果较好。

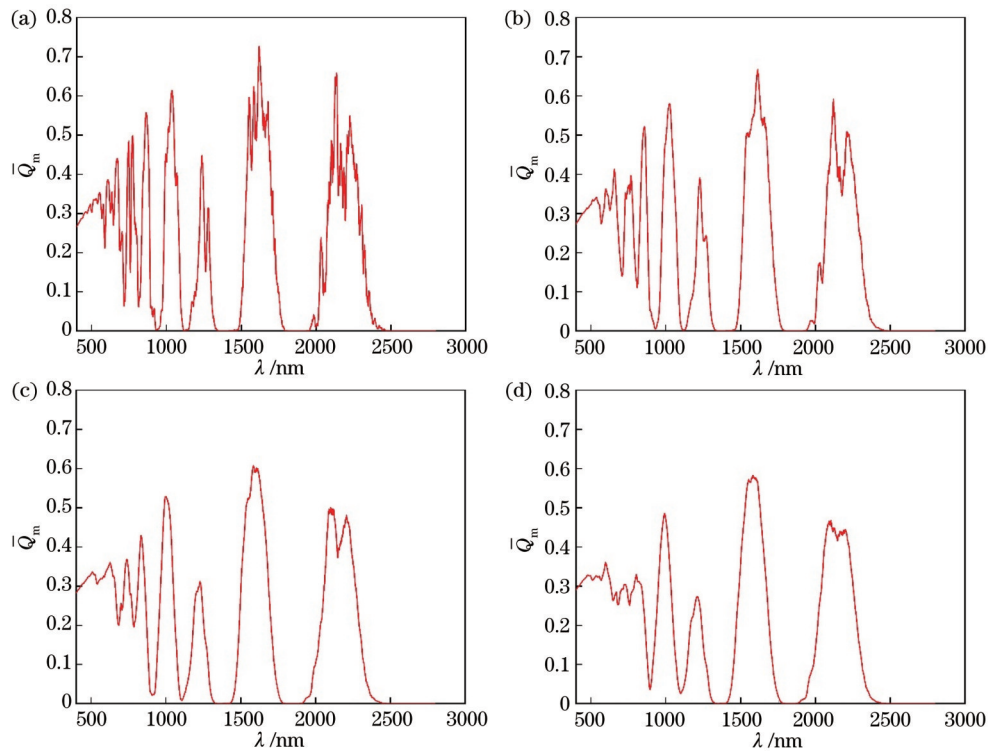


图 8 典型带宽下 \bar{Q}_m 的光谱特征曲线对比。(a) 10 nm; (b) 30 nm; (c) 60 nm; (d) 90 nm

Fig. 8 Spectral characteristic curves of \bar{Q}_m for typical bandwidths. (a) 10 nm; (b) 30 nm; (c) 60 nm; (d) 90 nm

表 1 典型带宽下的成像优选波段

Table 1 Optimal imaging bands over typical bandwidths

unit: nm

Bandwidth	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5
10	865-875	1036-1046	1620-1630	2137-2147	
30	856-886	1024-1054	1615-1645	2121-2151	
60		1000-1060	1585-1645	2102-2162	2208-2268
90		993-1083	1584-1674	2104-2194	2201-2291

4.2 气溶胶类型

不同地域对应的气溶胶类型是不同的,其描述了气溶胶粒子包含的不同成分,包括乡村型、海洋型、沙漠型等。图 9 给出三种典型气溶胶类型条件下,在带宽为 30 nm 时的 \bar{Q}_m 曲线。可以看到,不同气溶胶类型下的成像优选波段存在差异,然而 30 nm 带宽下最优成像波段均集中在 1629 nm 附近。

从图 9 中可以看出,不同气溶胶类型下,成像优选波段存在差异。表 2 给出每种气溶胶类型对应的 4 个成像效果较好的波段,其中在 856~886 nm、1029~1054 nm 和 1615~1642 nm 波段,三种气溶胶类型的成像效果较好,并且三种气溶胶类型的最优成像波段均为 1615~1642 nm。

综合考虑上述分析的两种影响因素,对不同情况的成像优选波段进行交集处理,发现在 1036~1046 nm、1620~1630 nm 波段可得到典型区域相对普适的、良好的成像质量。

5 成像实验和分析

实验使用光学相机对户外场景进行拍摄,通过在相机前加装滤光片实现对不同波段的成像,成像系统的其他参数设置保持不变,成像场景相对简单且距离相近,亮度差异较小。实验过程中选取了带宽为 10 nm、中心波长为 825 nm 和 870 nm 的两种滤光片进行对比,前者为理论成像差的波段,后者为理论成像好的波段。两个波段的实际成像如图 10 所示。

表 2 典型气溶胶类型条件下的成像优选波段

Table 2 Optimal imaging bands of typical aerosol types

unit: nm

Type	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5
Rural aerosol		856-886	1024-1054	1615-1645	2121-2151
Desert aerosol		856-886	1029-1059	1615-1645	2121-2151
Maritime aerosol	657-687	858-888	1024-1054	1612-1642	

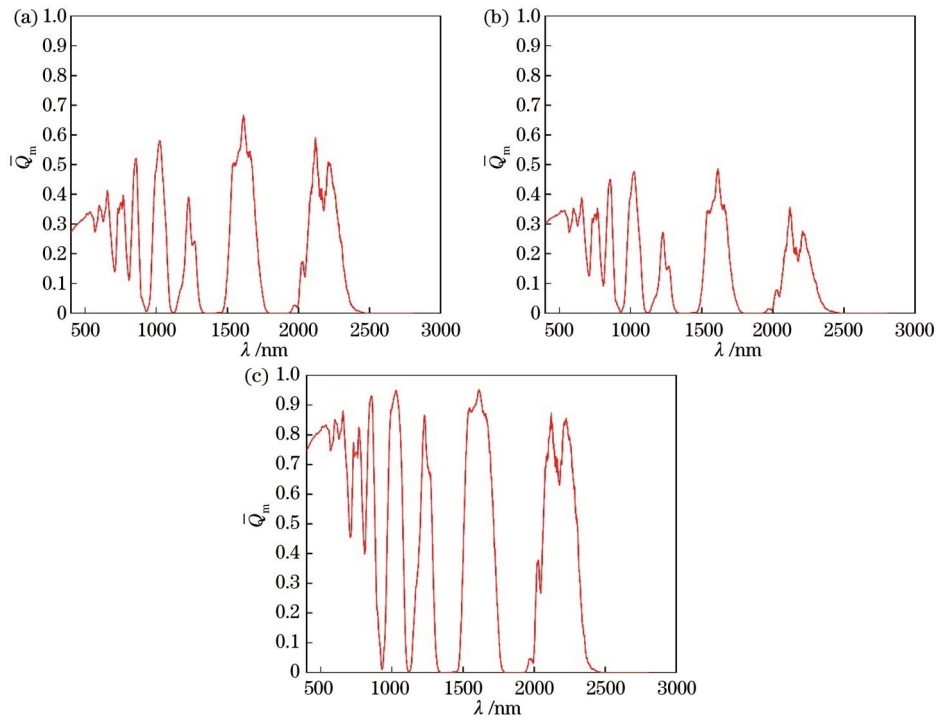


图 9 典型气溶胶类型下的 \bar{Q}_m 光谱特征曲线。(a)乡村型气溶胶;(b)海洋型气溶胶;(c)沙漠型气溶胶

Fig. 9 \bar{Q}_m curves of typical aerosol types. (a) Rural aerosol; (b) maritime aerosol; (c) desert aerosol

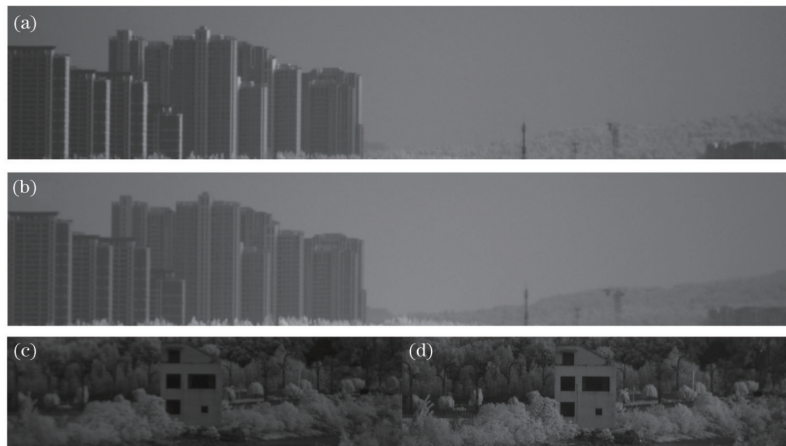


图 10 两个波段的实际成像。(a)(c) 825 nm;(b)(d) 870 nm

Fig. 10 Pictures of different bands. (a)(c) 825 nm; (b)(d) 870 nm

在图像中选择如图 11 所示的部分感兴趣区域,并绘制出其频谱图,如图 12 所示。

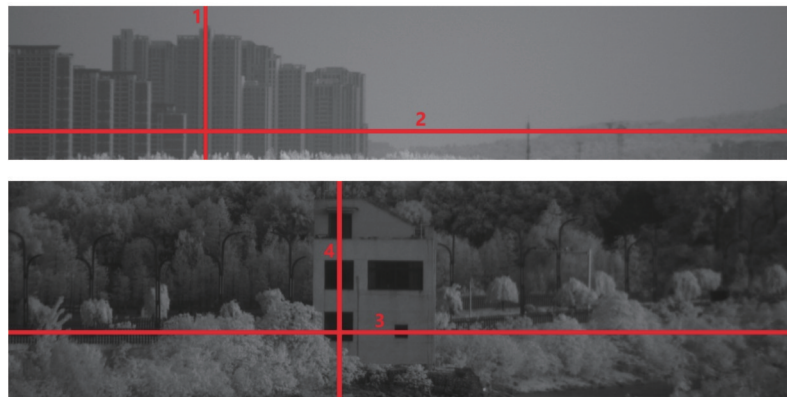


图 11 选取的图像感兴趣区域

Fig. 11 Selected regions of interest in images

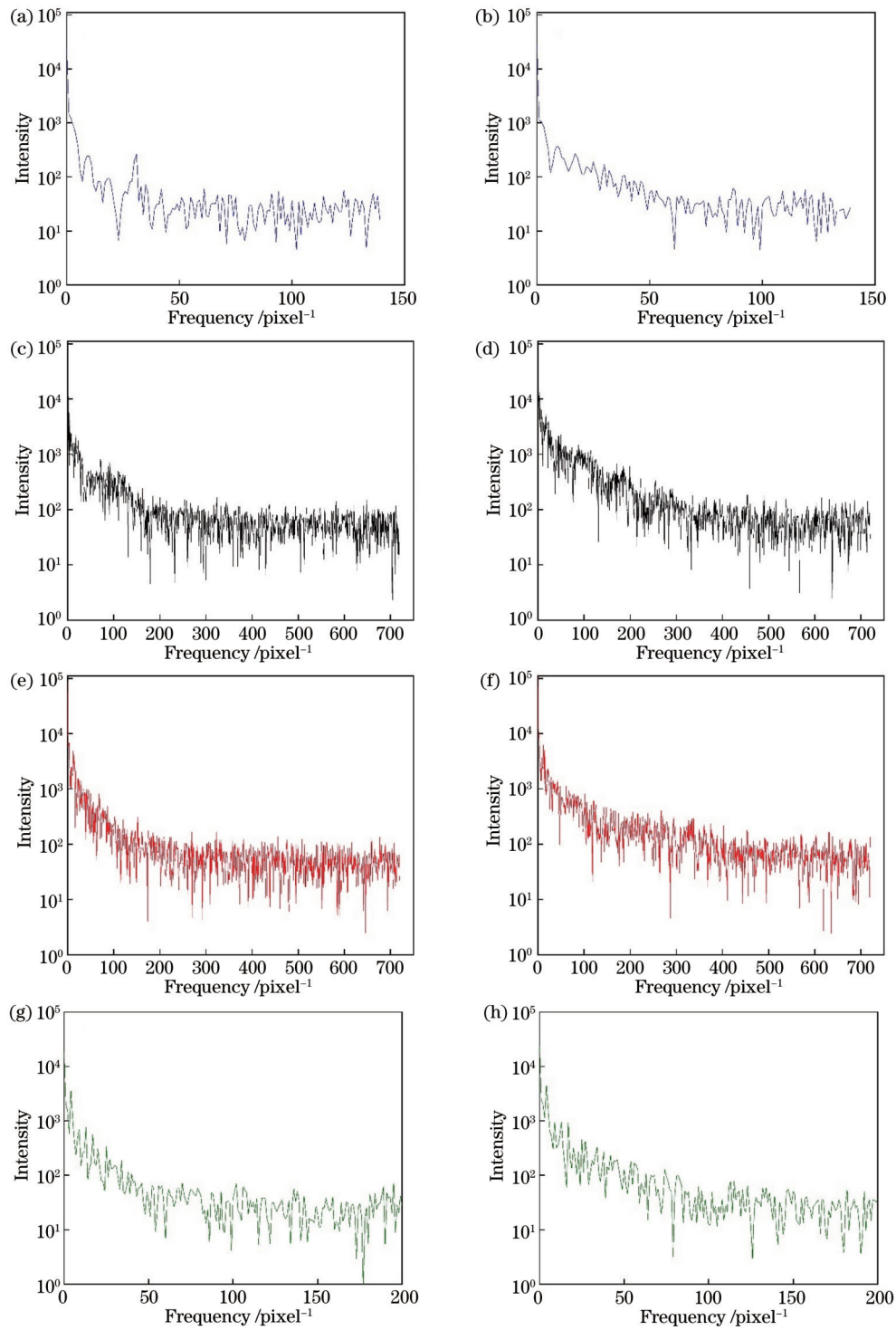


图 12 不同区域不同波长的频谱图。(a) 825 nm, 区域 1; (b) 870 nm, 区域 1; (c) 825 nm, 区域 2; (d) 870 nm, 区域 2; (e) 825 nm, 区域 3; (f) 870 nm, 区域 3; (g) 825 nm, 区域 4; (h) 870 nm, 区域 4

Fig. 12 Spectra of different parts and wavelengths. (a) 825 nm, region 1; (b) 870 nm, region 1; (c) 825 nm, region 2; (d) 870 nm, region 2; (e) 825 nm, region 3; (f) 870 nm, region 3; (g) 825 nm, region 4; (h) 870 nm, region 4

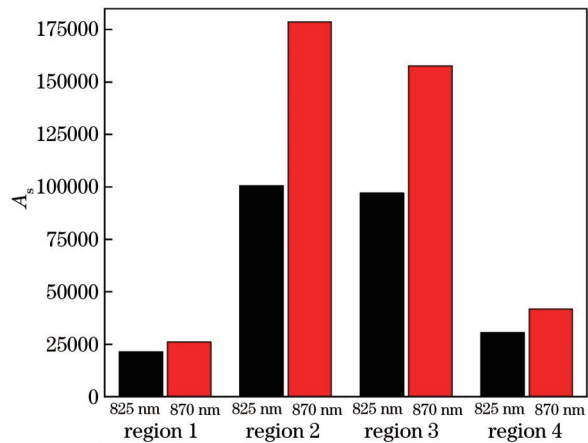
从频谱图中可以看出,对于 4 个区域,两种波长的频谱图都存在差别。为了可以定量地表征成像效果,将频谱曲线进行积分,用得出的谱面积 A_s 作为成像质量的评价标准^[2],如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,4 个区域均是 870 nm 对应的谱面积较大,说明 870 nm 条件下拍摄的图像包含的频

谱信息更多,这与波段选择方法给出的结果相符。

6 结 论

为了解决包含大气分子和气溶胶粒子的混浊大气中成像质量退化的问题,从空间频域的角度研究了成像质量评价和优化的方法。首先利用表观 MTF 计算

图 13 A_s 柱状图Fig. 13 Histograms of A_s

模型,给出了混浊大气表观MTF的光谱特征,提出了一个新的成像质量评价因子,其综合考虑了混浊大气衰减、多次散射和散射环境光的影响,并将此方法与采用透过率作为成像质量评判的方法进行了比较。

然后分析了成像优选波段的影响因素,包括3种典型的大气气溶胶类型和4种典型的成像带宽。结果表明:不同区域对应的不同气溶胶类型对波段选择的影响较小,而对成像带宽的影响较大,但不同带宽下的优选波段存在交叠。通过分析获得了典型条件下的成像优选波段,即在1036~1046 nm、1620~1630 nm波段可得到典型区域相对普适的、良好的成像质量。

最后对带宽为10 nm、中心波长为870 nm和825 nm的波段进行了成像实验,并且对所得图像进行了质量评价,所得结果在一定程度上证明了波段优选方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Volz F E. Scattering functions near the Sun by large aerosols[J]. Applied Optics, 1993, 32(15): 2773-2779.
- [2] 郑鑫, 武鹏飞, 饶瑞中. 天光背景下混浊大气中成像质量的分析方法[J]. 物理学报, 2018, 67(8): 088701.
Zheng X, Wu P F, Rao R Z. Image quality analysis method under background radiation in turbid atmosphere [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(8): 088701.
- [3] Lutomirski R F. Atmospheric degradation of electrooptical system performance[J]. Applied Optics, 1978, 17(24): 3915-3921.
- [4] Kopeika N S. Spatial-frequency dependence of scattered background light: the atmospheric modulation transfer function resulting from aerosols[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(5): 548-551.
- [5] Sadot D, Kopeika N S. Imaging through the atmosphere: practical instrumentation-based theory and verification of aerosol modulation transfer function[J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, 10(1): 172-179.
- [6] LeMaster D A, Eismann M T. Impact of atmospheric aerosols on long range image quality[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8355: 83550F.
- [7] Eismann M T, LeMaster D A. Aerosol modulation transfer function model for passive long-range imaging over a nonuniform atmospheric path[J]. Optical Engineering, 2013, 52(4): 046201.
- [8] Wells W H. Loss of resolution in water as a result of multiple small-angle scattering[J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(6): 686-691.
- [9] 李海巍, 张浩, 陈正超, 等. 去除大气邻近效应影响的遥感图像MTF计算方法[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328002.
Li H W, Zhang H, Chen Z C, et al. MTF computing method of remote sensing image after removing the effects of atmospheric adjacency effect[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328002.
- [10] Butrimas S, Driggers R G, Holst G C, et al. Effects of aerosol modulation transfer function on target identification[J]. Optical Engineering, 2020, 59(7): 073103.
- [11] 刘尚阔, 王涛, 李坤, 等. 光源光谱特性对空间相机调制传递函数检测的影响[J]. 物理学报, 2021, 70(13): 134208.
Liu S K, Wang T, Li K, et al. Influence of spectral characteristics of light sources on measuring space camera modulation transfer function[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(13): 134208.
- [12] Rao R Z. Equivalence of MTF of a turbid medium and radiative transfer field[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(2): 020101.
- [13] 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.
Rao R Z. General characteristics of modulation transfer function of turbid atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900125.
- [14] 周佳巧, 崔文楠, 张涛, 等. 基于光谱测量数据的自适应波段选择技术[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(23): 232501.
Zhou J Q, Cui W N, Zhang T, et al. Adaptive band selection technique based on spectral measurement data [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(23): 232501.
- [15] 关世豪, 杨桃, 卢珊, 等. 基于注意力机制的多目标优化高光谱波段选择[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2128002.
Guan S H, Yang G, Lu S, et al. Multi-objective optimization of hyperspectral band selection based on attention mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2128002.
- [16] 张立国, 孙胜春, 王磊, 等. 基于类间可分性的波段选择算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0428003.
Zhang L G, Sun S C, Wang L, et al. Band selection algorithm based on inter-class separability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0428003.
- [17] Stamnes K, Conklin P. A new multi-layer discrete ordinate approach to radiative transfer in vertically inhomogeneous atmospheres[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1984, 31(3): 273-282.

- [18] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 514-543.
Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 514-543.
- [19] Goody R M, Yung Y L. Atmospheric radiation: theoretical basis[M]. New York: Oxford University Press, 1989: 125-187.
- [20] 武鹏飞, 徐青山, 方帅, 等. 大气非均匀路径中图像退化光学模型[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0501002.
Wu P F, Xu Q S, Fang S, et al. Optical model of image degradation in atmospheric inhomogeneous path[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0501002.
- [21] 武鹏飞, 方帅, 徐青山, 等. 非均匀大气中单幅退化图像复原[J]. 电子学报, 2013, 41(10): 1895-1902.
Wu P F, Fang S, Xu Q S, et al. Single image dehazing in inhomogeneous atmosphere[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 1895-1902.