

大气湍流对航空光电侦察图像质量影响因素分析

吴雄雄 王惠林 宁飞 张文博 刘吉龙 王明超

Influencing factors of atmospheric turbulence on image quality of aerial photoelectric reconnaissance

WU Xiongiong, WANG Huilin, NING Fei, ZHANG Wenbo, LIU Jilong, WANG Mingchao

引用本文:

吴雄雄, 王惠林, 宁飞, 等. 大气湍流对航空光电侦察图像质量影响因素分析[J]. 应用光学, 2022, 43(1): 1–8. DOI: 10.5768/JAO202243.0101001

WU Xiongiong, WANG Huilin, NING Fei, et al. Influencing factors of atmospheric turbulence on image quality of aerial photoelectric reconnaissance[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(1): 1–8. DOI: 10.5768/JAO202243.0101001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0101001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

航空光电侦察图像质量影响因素分析

Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection

应用光学. 2021, 42(5): 817–829 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502001>

基于FPGA的实时大气湍流图像复原算法及实现

FPGA-based real-time atmospheric turbulence image restoration algorithm and its implementation

应用光学. 2021, 42(6): 1017–1024 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0602002>

基于大气湍流光闪烁的真随机数提取研究

Research on extraction of true random numbers based on turbulence-induced optical scintillation

应用光学. 2019, 40(3): 517–524 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0308003>

基于湍流模型的自适应光学系统响应矩阵测量方法

Measurement method of response matrix for adaptive optics systems based on turbulence model

应用光学. 2017, 38(6): 963–967 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0603004>

自由空间宽谱部分相干光通信系统

Free space optical communication system based on wide-spectrum partially coherent laser

应用光学. 2019, 40(1): 157–161 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0108001>

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 01-0001-08

大气湍流对航空光电侦察图像质量影响因素分析

吴雄雄, 王惠林, 宁 飞, 张文博, 刘吉龙, 王明超

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 大气湍流效应是严重影响航空光电侦察系统图像质量的重要因素之一。从大气湍流参数描述出发, 研究了大气湍流对光学系统成像质量的影响机理, 分析了大气湍流影响光学系统调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 的影响因素, 建立了大气湍流影响光学系统成像 MTF 的理论模型。仿真结果表明, 在大气湍流影响下, 光学系统光瞳口径与大气相干直径的比值对光学系统成像 MTF 影响较大。通过光学系统地面外场实验图像测试对比, 验证了实际光学系统受到大气湍流影响后的成像 MTF 理论模型。研究结果可为大气湍流影响下的航空光电侦察系统设计及提升其成像质量提供理论支持。

关键词: 大气湍流; 图像质量; 调制传递函数; 大气相干直径

中图分类号: TN205

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0101001

Influencing factors of atmospheric turbulence on image quality of aerial photoelectric reconnaissance

WU Xiongiong, WANG Huilin, NING Fei, ZHANG Wenbo, LIU Jilong, WANG Mingchao

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The atmospheric turbulence effect is one of the important factors that seriously affect the image quality of aerial photoelectric reconnaissance system. Starting from the description of atmospheric turbulence parameters, the influence mechanism of atmospheric turbulence on the imaging quality of optical system was researched, the influencing factors of atmospheric turbulence on the modulation transfer function (MTF) of optical system were analyzed, and the theoretical model of atmospheric turbulence on the imaging MTF of optical system was established. The simulation results show that under the influence of atmospheric turbulence, the ratio of optical system pupil aperture to atmospheric coherence diameter has a great influence on the imaging MTF. By comparing the ground field experimental images of the optical system, the imaging MTF theoretical model of the actual optical system affected by atmospheric turbulence was verified. The research results can provide theoretical supports for the design of aerial photoelectric reconnaissance system and the improvement of imaging quality under the influence of atmospheric turbulence.

Key words: atmospheric turbulence; image quality; modulation transfer function; atmospheric coherence diameter

引言

航空光电侦察系统可以提供高分辨率、高时效性的场景及目标图像, 具有侦察距离远、任务模式多、信息获取准确度高、机动性灵活等特点, 是当前空中预警监视、战场情报获取等应用的重要

侦察方式之一^[1-5]。目前国外航空光电侦察系统代表性产品主要有: 美国全球鹰上的广域侦察监视系统、Goodrich 公司的 DB110 相机、Recon/Optical (ROI) 公司的 CA295 相机等^[6-9]。国内航空光电侦察系统研究起步较晚, 装备的航空光电侦察设备

收稿日期: 2021-09-09; 修回日期: 2021-11-11

基金项目: 空军某预研课题

作者简介: 吴雄雄 (1992—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事机载光电系统设计方面的研究。E-mail: wuxx1992yygx@126.com

大多都是在国外的研究基础上开展进行的。

在航空光电系统成像过程中,光波远距离传播经过大气介质进入光学系统,受到气温、风速、压强等外部条件实时变化的影响,传播介质大气的折射率在时间和空间上产生无规律随机起伏变化,大气折射率呈现出均匀不规则的分布状态,造成光波相位与振幅紊乱,光波波前产生严重畸变,形成大气湍流效应,加上大气中浮动的水蒸气分子、沙尘等微观粒子对光波传播方向产生散射,导致光波传播路径发生偏折弯曲,严重降低光学系统成像质量。航空光电成像系统输出的图像质量是评价光电系统整体性能优劣的直观因素,直接决定了系统获取复杂外界信息的能力,因此研究航空光电系统成像质量的影响因素一直以来都是光电系统设计师、制造者、使用者们关注的焦点^[1]。

航空光电成像系统属于远距离大口径光学侦察系统,目前已经具备高效能的场景实时侦察与监视、目标探测、定位与跟踪等技术功能。在航空光电成像系统观测成像时,由于受到大气湍流的影响,获得的侦察图像产生严重失真,大口径光学成像系统不能充分发挥其良好的成像性能,表现为成像具有模糊、重影和畸变,且照度不均匀等。这些由大气湍流效应带来的干扰,严重影响航空大口径光学系统的成像性能,阻碍遥感观测成像技术的发展。因此,研究大气湍流对航空光电系统成像质量的影响机理,找出大气湍流对航空光电系统成像质量的影响因素非常重要。

本文针对上述需求分析,首先研究了描述大气湍流参数的物理量——大气折射率结构常数与大气相干直径的理论模型,然后使用光学调制传递函数MTF表征光学系统的成像质量,详细研究了大气湍流效应影响光学系统MTF的理论模型,并通过实拍图像测试对比验证,给出相应结论。

1 大气湍流参数描述

描述大气湍流的主要参数有大气折射率结构常数、大气相干直径。实际大气十分复杂,描述大气湍流的参数众多,大气湍流参数受天气状况、地理条件、空气洁净度等因素影响,无法实时准确地确定大气湍流的性质^[10-12]。在光波传播成像的研究中,尽管流体动力学和大气环流的研究者们希望对大气湍流参数的研究更加丰富,但是对光学工作者来说,为了预估大气光学湍流的成像影响,

使用大气折射率结构常数 C_n^2 和大气相干直径 r_0 这2个参数描述大气湍流效应已经足够。

1.1 大气折射率结构常数

大气折射率的不规则起伏变化造成光波传播方向上波前振幅及相位紊乱,严重影响光学系统的成像质量。大气折射率结构常数 C_n^2 是用于描述大气湍流强度的物理量,近年来学者们对大气折射率结构常数 C_n^2 特征性质的研究越来越多,发展了多种测试手段。受限于大气介质本身的复杂性,很难提出一种通用的模型来阐明大气折射率结构常数 C_n^2 的性质。

大气折射率结构常数随着高度和时间发生变化,一般情况下,测量大气折射率结构常数是大量的观测试验研究其统计特性。从光学系统空对地成像的适用场景出发,根据实际观测数据,应用比较广泛的是Hufnagel模型^[13],该模型描述了大气折射率结构常数与高度之间的函数关系,如(1)式所示:

$$C_n^2 = 2.7 \times 10^{-16} \left[2.2 \times 10^{-37} h^{10} (v/27)^2 \times e(-h/1000) + e(-h/1500) \right] (\text{m}^{-2/3}) \quad (1)$$

大气折射率结构常数 C_n^2 具有长度的 $-2/3$ 次幂的量纲,是光学湍流强度的代名词。(1)式中: h 表示海拔高度,一般适用于3 km~24 km的范围; v 表示平均风速。根据Hufnagel模型得到的 C_n^2 与高度 h 曲线关系如图1所示。

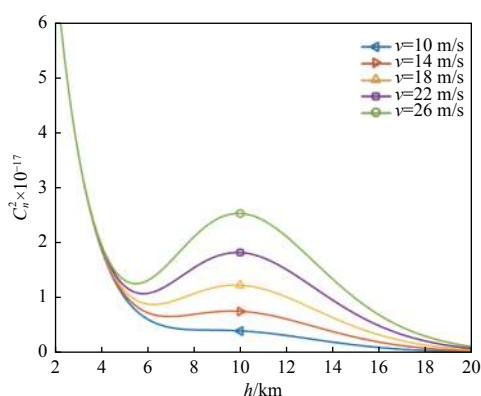


图1 Hufnagel模型中 C_n^2 曲线

Fig. 1 C_n^2 curves of Hufnagel model

从图1中可以看出大气折射率结构常数 C_n^2 或者说大气湍流强度具有明显的高度变化特征,在4 km高度以内,大气折射率结构常数 C_n^2 与风速无关,且随着高度增加,大气折射率结构常数下降较快,起伏强度大。随着高度增加,大气折射率

结构常数整体规律为高度越高, 起伏强度越小, 但是在高度 $h=10$ km 处有峰值, 且随着风速增加, 大气折射率结构常数增大, 大气湍流强度增大。

当高度较低(500 m 以内), 适用 Tatarski 模型进行描述^[14], 如(2)式所示:

$$C_n^2(h) = C_{n0}^2 h^{-\frac{4}{3}} \quad (2)$$

该模型适用于无云的晴朗天空, 其中 $C_{n0}^2 = 4.16 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。根据 Tatarski 模型得到的 C_n^2 与高度 h 曲线关系如图 2 所示, 大气折射率结构常数 C_n^2 随着高度增加按照负指数规律急剧下降。

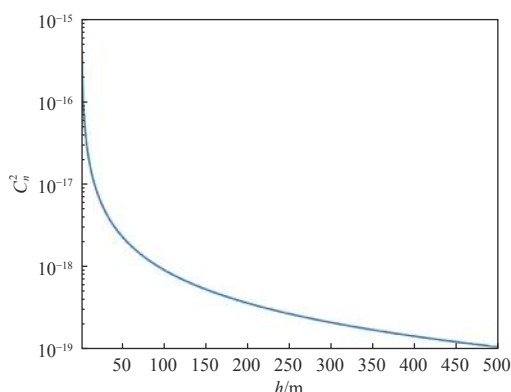


图 2 Tatarski 模型中 C_n^2 曲线
Fig. 2 C_n^2 curve of Tatarski model

1.2 大气相干直径

大气湍流对光波的影响根本上是破坏其相干性, 从而导致一系列物理量的改变。各种物理量可分为与相位相关的量和与振幅相关的量。在不同应用系统中, 各种物理量的作用是不同的, 如在航天通信、激光空间传输的应用中, 关心与振幅相关的物理量, 而在光学系统成像应用中, 关心与相位相关的物理量^[10]。在光学系统成像过程中, 光波经过湍流大气介质进入光学系统, 由于大气折射率不规则的起伏变化, 导致传输光的相干性遭到破坏, 引起光波相位起伏, 产生波前畸变, 造成光学图像模糊。

为了在空间尺度描述大气湍流对光波波前扰动强度, Fried 引入了大气相干直径 r_0 ^[15-16], 其光学成像的物理意义为: 在有大气湍流效应的条件下, 当光学系统光瞳口径大于 r_0 时, 光学系统的衍射极限成像分辨率不再与光瞳口径有关, 而是由大气相干直径 r_0 来确定, 此时大口径光学成像系统不能充分发挥其大口径的成像优势。

大气相干直径 r_0 与大气折射率结构常数密切相关, 对于常见的球面光波在湍流中传播, 其大气

相干直径 r_0 定义为

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} \left[\int_0^R \left(\frac{\eta}{R} \right)^{5/3} C_n^2(\eta) d\eta \right]^{-3/5} \quad (3)$$

式中 η 为斜程路径长度, 如图 3 所示。

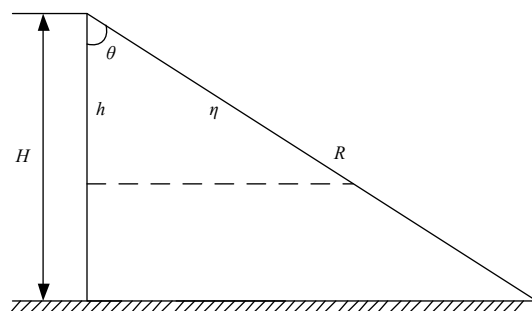


图 3 斜程路径长度与高度的几何关系

Fig. 3 Geometrical relationship between slant path length and height

从图 3 中的几何关系可得 $\eta = h \cdot \sec \theta$, 将斜程 η 用高度 h 替代, 得到(4)式:

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} \left[\sec \theta \int_0^H \left(\frac{h \sec \theta}{R} \right)^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (4)$$

当把 $C_n^2(h)$ 看做为常数时, 计算(4)式得到:

$$r_0 = 0.185 \lambda^{6/5} \left(\frac{3}{8} R C_n^2 \right)^{-3/5} = 0.185 \left(\frac{8 \lambda^2}{3 R C_n^2} \right)^{3/5} \quad (5)$$

大气相干直径 r_0 表征了大气湍流影响下光学系统成像质量的衍射极限分辨率, 反映了大气随机扰动对目标光学成像的影响程度, 大气相干直径越大, 表示大气条件越好, 大气相干直径 r_0 与传播路径长度 R 的关系如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着路径长度 R 减小, 也就是说随着观测目标距离减小, 大气相干直径 r_0 增大。另外大气折射率结构常数 C_n^2 减小, 也会提高大气相干直径 r_0 。从图 4 还可以得到, 为了提高大气相干直径, 可以提高光学系统相应的成像波长, 可以从可见光波段向短波或者中波红外及长波红外波段扩展。

2 大气湍流对光学系统 MTF 的影响分析

对于光学成像系统, 光学传递函数 MTF 是表征评价其成像质量最直接、最全面、最科学、最准确的评价方法^[17-18], 已被全世界广泛使用于光学设计、光学成像质量检测 and 评价等方面。因此, 大气湍流对光学系统成像质量的影响可以表征为大气湍流对光学系统 MTF 的影响。大气湍流造成的

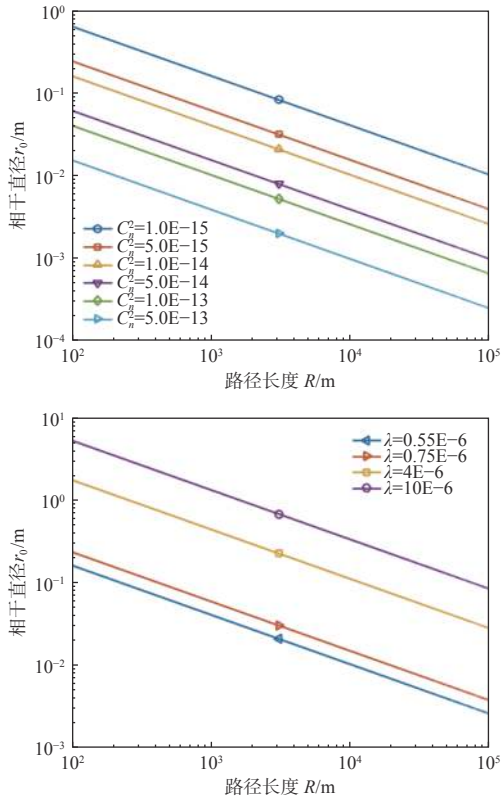


图4 相干直径与路径长度的关系

Fig. 4 Relationship between coherence diameter and path length

MTF下降表达式如(6)式所示:

$$\text{MTF}_{\text{turb}} = \exp \left\{ -3.44 (\lambda f P / r_0)^{5/3} \left[1 - \alpha (\lambda f P / D)^{1/3} \right] \right\} \quad (6)$$

式中: D 为光学系统光瞳口径; f 为光学系统焦距; r_0 为大气相干直径; P 为空间频率 (cycle/mm)。将空间频率 P (cycle/mm) 转换为物空间的角频率 f_x (cycle/mrad): $f_x = P \cdot f$, 此时(6)式变为

$$\text{MTF}_{\text{turb}} = \exp \left\{ -3.44 (\lambda f_x / r_0)^{5/3} \left[1 - \alpha (\lambda f_x / D)^{1/3} \right] \right\} \quad (7)$$

式中 α 为对应不同条件下的 Fried 修正因子^[19]。当 $\alpha=0$ 时, 对应于长曝光情况, $\alpha=1$ 对应于近场短曝光, $\alpha=0.5$ 对应于远场短曝光。其中近场是指光波经过湍流大气介质的距离 L 较近, 满足关系式 $\sqrt{L\lambda} < D$, 远场是指光波经过湍流大气介质的距离 L 较远, 满足关系 $\sqrt{L\lambda} > D$ 。

大气湍流效应带来的综合光学传递函数 MTF 下降可以表示为衍射限光学传递函数 MTF_{diff} 与大气湍流 MTF_{turb} 的乘积, 即 $\text{MTF}_{\text{optics}} = \text{MTF}_{\text{diff}} \cdot \text{MTF}_{\text{turb}}$ 。对一个圆孔径理想衍射受限光学成像系统, 光学传递函数 MTF_{diff} 如(8)式所示:

$$\text{MTF}_{\text{diff}}(f_x) = \frac{2}{\pi} \left[\cos^{-1} v - v \sqrt{1-v^2} \right] \quad (8)$$

式中: v 表示归一化频率, $v = f_x / f_{\text{oco}}$; f_x 表示空间频率 (cycle/mrad); $f_{\text{oco}} = D/\lambda$ 表示光学截止频率 (cycle/mrad)。

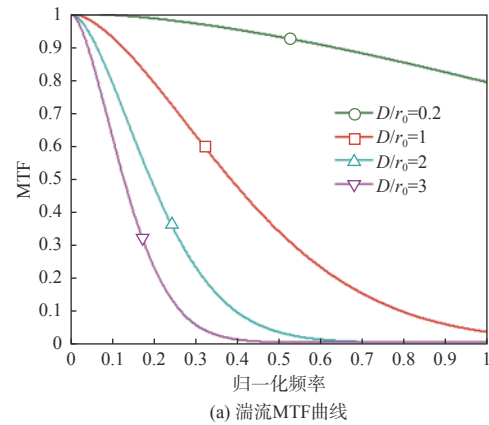
将大气湍流 MTF 用归一化频率 v 表示, 有:

$$\text{MTF}_{\text{turb}} = \exp \left\{ -3.44 \left(\frac{D}{r_0} v \right)^{5/3} [1 - \alpha v]^{1/3} \right\} \quad (9)$$

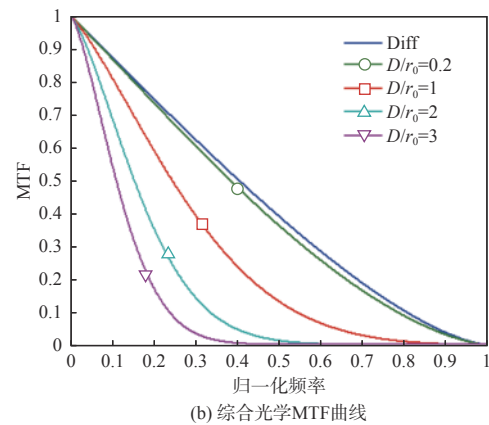
因此, 大气湍流效应带来的综合光学传递函数 MTF 用归一化频率表示为

$$\text{MTF}_{\text{optics}} = \text{MTF}_{\text{diff}} \cdot \text{MTF}_{\text{turb}} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos(v) - v \sqrt{1-v^2} \right] \cdot \exp \left\{ -3.44 \left(\frac{D}{r_0} v \right)^{5/3} [1 - \alpha v]^{1/3} \right\} \quad (10)$$

图5为 MTF 曲线图。其中图5(a)为修正因子 $\alpha=0$ 时, D/r_0 分别为 0.2、1、2、3 时的湍流 MTF 曲线, 该曲线反映了大气湍流效应引起理想光学传递函数的下降情况; 图5(b)表示了具有湍流效应的综合光学 MTF 曲线。



(a) 湍流MTF曲线



(b) 综合光学MTF曲线

图5 MTF 曲线图(修正因子 $\alpha=0$)Fig. 5 MTF curves (correction factor $\alpha=0$)

图 6 为修正因子 $\alpha=0.5$ 时, D/r_0 分别为 0.2、1、2、3 时的湍流 MTF 曲线及有湍流效应的综合光学 MTF 曲线。

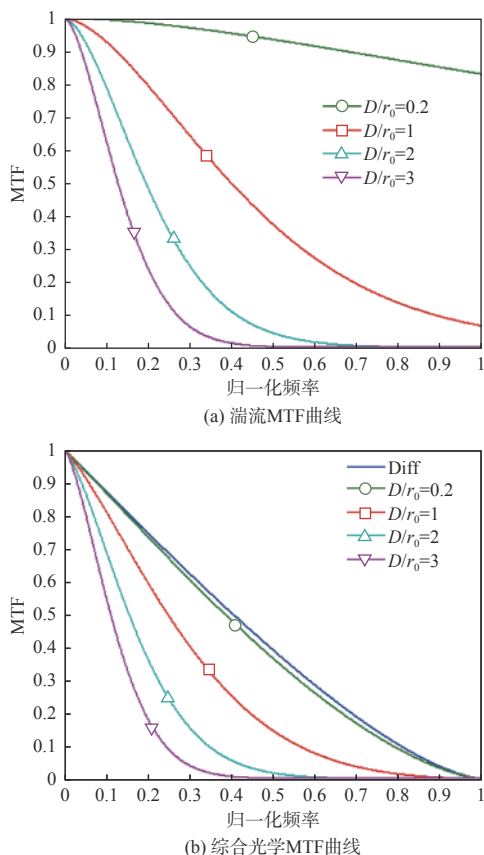


图 6 MTF 曲线图(修正因子 $\alpha=0.5$)

Fig. 6 MTF curves (correction factor $\alpha=0.5$)

图 7 为修正因子 $\alpha=1$ 时, D/r_0 分别为 0.2、1、2、3 时的湍流 MTF 曲线及有湍流效应的综合光学 MTF 曲线。

从图 5~图 7 这 3 组图中可以看出, Fried 修正因子 α 对湍流大气 MTF 的影响较小, 进而对光学系统 MTF 影响较小; 但是, 对大气湍流 MTF 或者光学 MTF 影响较大的是光学系统口径 D 与大气相干直径 r_0 的比值。文献 [19] 指出, 作为理论模型的经验估计, 如果 D/r_0 小于 0.2, 湍流对光学系统的成像影响可忽略不计。从以上 3 组图中的分析可以验证该经验估计, 当 D/r_0 小于 0.2 时湍流对光学系统的成像 MTF 影响可忽略不计。

3 试验对比分析

为了验证实际航空光电系统受到大气湍流效应影响成像 MTF 的理论模型, 我们在外场进行试验获取实拍图像。由于航空光电系统挂飞试验条件苛刻, 挂飞成本较高, 于是采用在高层建筑物平

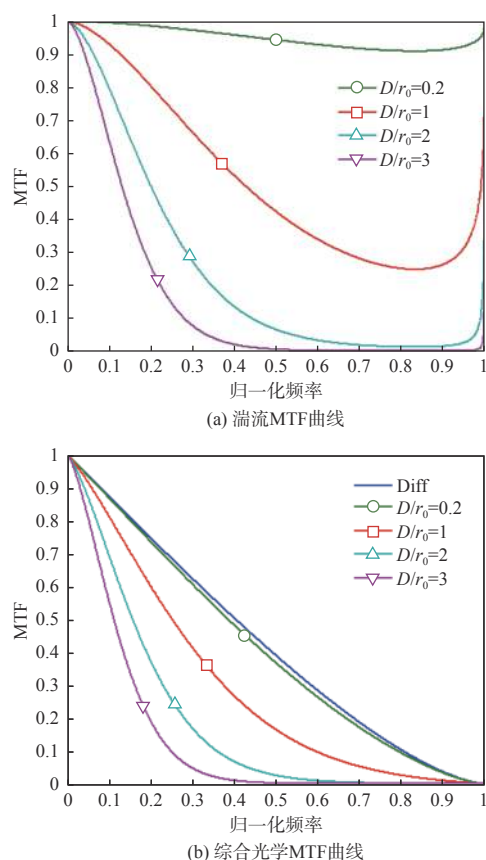


图 7 MTF 曲线图(修正因子 $\alpha=1$)

Fig. 7 MTF curves (correction factor $\alpha=1$)

台架设光学系统的方法获取实拍图像。实验时间是早上 8:00~11:00, 天气晴朗, 水平能见度约 12 km, 相对湿度 80%, 在该时间段内, 大气折射率结构常数受大气温度变化的影响较小^[20]。被测光学系统为航空大口径反射式长焦光学系统, 架设高度距地约为 50 m, 距离目标斜距约 2 km。根据此条件, 首先计算大气湍流效应影响光学系统成像 MTF 理论模型中的大气折射率结构常数 C_n^2 和大气相干直径 r_0 。

由于被测光学系统架设高度为 50 m, 因此按照 Tatarski 模型(2)式计算大气折射率结构常数。取 $C_{m0}^2 = 4.16 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, 代入(2)式计算得到在高度为 50 m 处的大气折射率结果常数为 $C_n^2(50) = 2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ 。

实际光学系统的工作波段为近红外 $0.6 \mu\text{m} \sim 0.9 \mu\text{m}$, 取该波段的中心波长 $\lambda = 0.75 \mu\text{m}$, 代入(5)式计算大气相干直径, 得到大气相干直径 $r_0 = 102.7 \text{ mm}$, 实际光学系统口径 $\phi = 250 \text{ mm}$ 。此条件下, 被测光学系统光瞳直径与大气湍流引起的理论相干直径比值约为 2.43, 远大于上文分析的经验值 0.2。

一般情况下航空光电成像属于短曝光。在短

曝光时间内,湍流大气可看做为冻结介质,因此短曝光能够减小大气湍流带来的不良影响。由于系统距离目标约 2 km,此条件下满足关系式 $\sqrt{L\lambda} < D$,因此属于近场短曝光条件,此时,修正因子 $\alpha=1$,有湍流效应的综合光学系统 MTF 表达式如(11)式所示,得到的具有湍流效应的综合光学 MTF 曲线如图(8)中蓝色实线所示,图(8)中红色虚线为理想光学系统衍射受限 MTF 曲线。

$$\text{MTF}_{\text{optics}} = \text{MTF}_{\text{diff}} \cdot \text{MTF}_{\text{turb}} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos(v) - v \sqrt{1-v^2} \right] \cdot \exp \left\{ -3.44 \left(\frac{D}{r_0} v \right)^{5/3} [1-v]^{1/3} \right\} \quad (11)$$

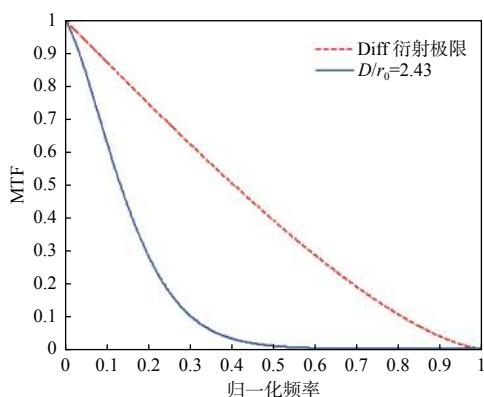


图8 具有湍流效应的综合光学 MTF 曲线

Fig. 8 Integrated optical MTF curve with turbulence effect

外场实验架设光学系统如图 9(a)所示,获取的实拍图像如图 9(b)所示,在该图像中选取符合条件的刃边图像,如图 9(b)方框所示。根据选取的刃边图像获取其边缘扩展函数(ESF),然后求导得到对应的线扩展函数(LSF),最后通过对线扩展函数进行一维傅里叶变换得到 MTF 曲线。整个过程可以通过使用专业图像分析软件 Imatest^[21]完成,获得的 MTF 曲线如图 9(c)所示。另外,在实验室光学平台测试光学系统的成像性能,得到的光学系统 MTF 曲线如图 10 所示。

为了将大气湍流效应影响下的理论模型成像 MTF、大气湍流效应影响下的实拍图像 MTF、实验室条件下测试的 MTF 曲线进行对比,将图 8、图 9(c)、图 10 曲线置于同一幅图中。由于实验室测试 MTF 曲线中归一化最高频率 1 处对应于光学系统的奈奎斯特频率,也就是对应于图 8、图 9(c)中的 0.5 频率处,因此将三者 MTF 绘制于同一幅图像中时,取横坐标最大频率为奈奎斯特频率(归一化频率为 0.5),如图 11 所示。

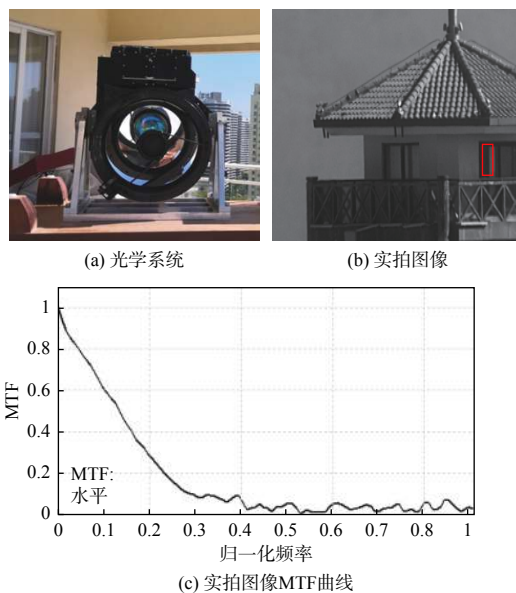


图9 实际光学系统实拍图像及其 MTF 曲线

Fig. 9 Real image of actual optical system and its MTF curve

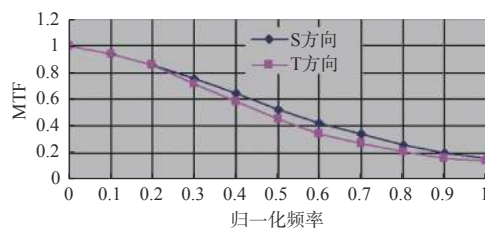


图10 实验室测试 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves tested in laboratory

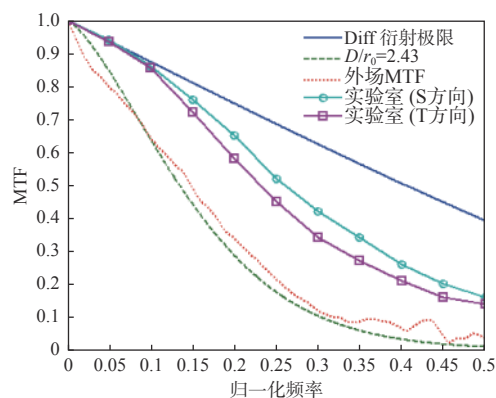


图11 MTF 曲线对比

Fig. 11 Contrast of MTF curves

从图 11 可以看出,在受到大气湍流效应影响的条件下,外场实拍图像 MTF 曲线与大气湍流理论模型得到的 MTF 曲线($D/r_0=2.43$)较为接近,验证了实际光学系统受到大气湍流效应影响后的成像 MTF 理论模型。还可以看出,实验室测试光学

系统的 MTF 曲线明显高于外场实拍图像 MTF 曲线或者大气湍流理论模型 MTF 曲线 ($D/r_0=2.43$), 这是因为实验室测试光学系统传递函数处于室内静态环境, 没有受到大气湍流效应的影响。

4 结论

大气湍流效应严重影响航空光电成像系统的成像质量。本文仿真分析了大气湍流效应对光学成像系统 MTF 的影响, 并通过实拍图像进行验证对比。得出的结论是: 在大气湍流的作用下, 单纯提高航空光学系统口径对提高光学成像质量意义不大, 应该重点提高大气相干直径, 减小大气折射率结构常数, 从而减小大气湍流效应带来的成像扰动影响。主要可以采取的措施有提高光学系统成像波长, 比如由可见光波段向近红外或者短波扩展; 另外可以减小目标观测距离, 当光学系统对近距离目标观测时, 大气湍流效应减弱明显; 但是一般情况下, 受限航空光学侦察系统的应用需求, 远距离观测目标不可避免, 为了克服远距离观测目标大气湍流对光学系统成像质量的影响, 还可以采用自适应光学技术或者图像处理等一些技术手段提升光学系统成像质量。

参考文献:

- [1] 王惠林, 刘吉龙, 吴雄雄, 等. 航空光电侦察图像质量影响因素分析[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 817-829.
WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongiong, et al. Analysis of image quality influencing factors for aerial electro-optical detection[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 817-829.
- [2] 朱海滨, 邵毓, 张远健, 等. 可见光/红外双视场全景式航空侦察相机光学系统设计[J]. *应用光学*, 2017, 38(1): 7-11.
ZHU Haibin, SHAO Yu, ZHANG Yuanjian, et al. Optical system design of visible/infrared and double-FOV panoramic aerial camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 7-11.
- [3] 李永昆, 林招荣, 张绪国. 国外远距斜视航空相机发展概况[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(6): 11-18.
LI Yongkun, LIN Zhaorong, ZHANG Xuguo. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(6): 11-18.
- [4] 贾平, 张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(1): 82-88.
JIA Ping, ZHANG Bao. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 82-88.
- [5] 刘海英, 王跃, 王英, 等. 大视场航空相机光学系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 980-986.
LIU Haiying, WANG Yue, WANG Ying, et al. Design of optical system for large-field of view aerocamera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 980-986.
- [6] 沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 20-29.
SHEN Honghai, HUANG Meng, LI Jiaquan, et al. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29.
- [7] LEE J H, JUNG Y S, RYOO S Y, et al. Imaging performance analysis of an EO/IR dual band airborne camera[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(2): 174-181.
- [8] IYENGAR M. The Goodrich 3rd generation DB-110 system: operational on tactical and unmanned aircraft[J]. *SPIE*, 2006: 6209E: 620909-1-14.
- [9] WYATT S H. Dual spectral band reconnaissance systems for multiple platforms[J]. *SPIE*, 2002, 4824: 36-46.
- [10] 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.
RAO Ruizhong. Light propagation in the turbulent atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005.
- [11] 邹皓, 李清瑶, 赵群, 等. 大气湍流参数对图像退化效果影响的研究[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(4): 95-99.
ZOU Hao, LI Qingyao, ZHAO Qun, et al. Research on influence of atmospheric turbulence parameters on image degradation[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(4): 95-99.
- [12] 吴健, 杨春平, 刘建斌. 大气中的光传输理论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
WU Jian, YANG Chunping, LIU Jianbin. Theory of light transmission in the atmosphere[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005.
- [13] LEI F, TIZIANI H J. Atmospheric influence on image quality of airborne photographs[J]. *Optical Engineering*,

- 1993, 32(9): 2271-2280.
- [14] TATARSKI V I. Wave propagation in a turbulent medium[M]. USA: Courier Dover Publications, 2016.
- [15] FRIED D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [16] FRIED D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(10): 1380-1384.
- [17] 康登魁, 杨鸿儒, 袁良, 等. 可见光电视摄像机整机 MTF 测量装置及方法[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 134-139.
- KANG Dengkui, YANG Hongru, YUAN Liang, et al. Measurement device and method of MTF for visible TV camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 134-139.
- [18] 官明朕, 张晓辉, 张宁. 基于改进倾斜刃边法的 CCD 相机调制传递函数的测量[J]. *应用光学*, 2016, 37(1): 100-104.
- GUAN Mingzhen, ZHANG Xiaohui, ZHANG Ning. MTF measurement of CCD digital camera based on improved slanted-edge method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(1): 100-104.
- [19] HOLST G C. Electro-optical imaging system performance[M]. 5th ed. Washington DC: JCD Publishing, 2008: 309.
- [20] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- RAO Ruizhong. Modern atmospheric optics [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [21] XU D, ZHANG X. Study of MTF measurement technique based on special object image analyzing[C]// 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. USA: IEEE, 2012: 2109-2113.