

文章编号:1001-5078(2025)01-0091-06

· 光电技术与系统 ·

大气湍流对机载电视成像系统作用距离的影响

负平平,侯利冰,卜忠红,宋慧娟,李超
(西安应用光学研究所,陕西西安710065)

摘要:大气湍流严重影响机载电视成像系统的成像质量。对目标和背景光学信号传输成像机理进行分析,建立了包含大气湍流效应的基于最小可分辨对比度(MRC)的电视成像系统作用距离模型。对大气湍流基本理论进行分析,分析得出适用于直升机载电视成像系统的大气折射率结构常数,给出了大气相干直径计算方法,建立了大气湍流调制传递函数。以某型直升机载电视成像系统为例,对大气湍流效应对电视成像系统作用距离的影响进行仿真分析,仿真结果表明大气湍流效应使直升机载电视成像系统的作用距离性能严重下降。研究结果可为直升机载电视成像系统作用距离指标论证提供参考,提高指标论证准确度。

关键词:大气湍流;大气相干直径;调制传递函数;机载电视成像系统;作用距离预测

中图分类号:TN911.73;P427 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.014

The impact of atmospheric turbulence on the acquisition range of airborne television imaging system

YUN Ping-ping, HOU Li-bing, BU Zhong-hong, SONG Hui-juan, LI Chao
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Atmospheric turbulence seriously affects the imaging quality of airborne television imaging systems. In this paper, an analysis is conducted on the imaging mechanism of optical signal transmission for targets and backgrounds, and a Minimum Distinguishable Contrast (MRC)-based television imaging system acquisition range model is established, which includes atmospheric turbulence effects. The basic theory of atmospheric turbulence is analyzed, and the atmospheric refractive index structure constant suitable for helicopter borne television imaging systems is obtained. A calculation method for atmospheric coherence diameter is provided, and a modulation transfer function for atmospheric turbulence is established. Taking a certain type of helicopter borne television imaging system as an example, the influence of atmospheric turbulence on the acquisition range of the television imaging system is simulated and analyzed. The simulation results show that the atmospheric turbulence effect seriously reduces the acquisition range performance of the helicopter borne television imaging system. The research results can provide a reference for the demonstration of the acquisition range index of helicopter borne television imaging systems, and improve the accuracy of indicator demonstration.

Keywords: atmospheric turbulence; atmospheric coherence diameter; modulation transfer function; airborne television imaging system; acquisition range predicting

基金项目:航空装备预先研究项目(No. 30105010502)资助。

作者简介:负平平(1981-),男,硕士,研究员,主要从事机载光电系统总体技术方面研究。E-mail:mailto_ypp@163.com

收稿日期:2024-03-07

1 引言

机载光电成像系统装备于直升机、无人机、战斗机等各型飞机上,用于空对地侦察、监视、跟踪、瞄准和火力引导。机载光电成像系统一般由电视摄像机、红外热像仪、激光测距机/测照器等组成,作用距离属于机载光电成像系统的核心性能指标,是实现先敌发现、远距攻击作战使命的关键。机载光电成像系统工作在大气环境之中,而大气是一种典型的非均匀介质^[1],大气间热流与地球表面的不平衡形成了大气湍流运动,光波在大气中传播时,大气湍流扰动使光波相位和振幅信息产生随机起伏,产生一系列的大气湍流效应,导致成像系统像点模糊和抖动,严重降低了成像系统的分辨率,影响成像质量和作用距离性能。文献[2]和文献[3]提出了采用基于最小可分辨对比度(MRC)作用距离模型对机载光电成像系统中的电视成像系统作用距离性能指标进行预测,但其计算模型中未考虑大气湍流的影响,作用距离性能预测结果与实际场景的测试结果存在偏差,因此有必要针对大气湍流对机载电视成像系统作用距离影响进行研究。

国内外众多学者针对大气湍流对光学成像系统的影响进行了研究,D. L. Fried^[4-5]推导了随机非均匀介质下的大气湍流光学传递函数,提出了大气相干直径的概念,详细推导了长曝光和短曝光条件下光学成像系统分辨率表达式,并比较了长曝光与短曝光的区别。J. W. Goodman^[6]和 M. C. Roggemann^[7]等人讨论了大气湍流对光学成像系统分辨率的影响。张晓芳^[8]等人采用不同的大气湍流模型,计算了大气相干直径在不同大气湍流模型下的不同数值,并对空-地与地-空系统的大气相干直径进行了计算比较,分析得出空-地观测系统大气湍流与飞行高度密切相关,飞行高度越低光学系统成像分辨力受大气湍流影响越明显。吴雄雄^[9]等人研究了大气湍流对光学系统成像质量的影响机理,建立了大气湍流影响光学系统成像 MTF 的理论模型,仿真表明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,并指出可见光波段/近红外波段成像系统比中波红外成像系统更容易受大气湍流的影响。现有研究表明,低空的可见光波段/近红外波段成像系统更容易受大气湍流的影响。

直升机载电视成像系统具有飞行高度低、在可见光波段/近红外波段进行成像的特点,成像质量容易受到大气湍流的影响。本文针对直升机载电视成像系统的特点开展研究,分析大气湍流影响直升机载电视成像系统成像质量的机理,研究大气湍流对作用距离性能影响的仿真计算模型,给出仿真分析结果,为直升机载电视成像系统装备论证和研制提供理论支撑。

2 电视作用距离预测模型

近年来,电视成像系统性能评价理论取得了进展,其中 MRC 是一种可定量描述电视成像系统阈值对比度的评价参量,它综合了系统灵敏度和噪声、目标空间频率以及人眼视觉特性等因素,能更全面地反映电视成像系统的极限性能。与红外热成像系统最小可分辨温差(MRTD)类似,是电视成像系统成像质量的主观和客观评价相结合的可测试性能参量,测量结果受人眼视觉特性和观察者心理因素的影响。

如图 1 所示,目标和背景光学信号经大气、光学系统、成像传感器、信号处理等传输后,在显示器上成像,人眼对显示器进行观察,完成对目标的探测与识别。

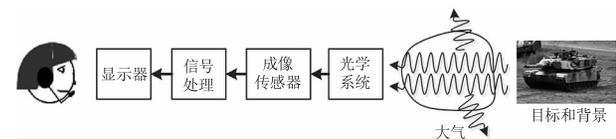


图 1 目标和背景光学信号传输成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical signal transmission imaging for target and background

基于上述成像过程,描述目标与背景对比度的传输过程。目标和背景的对比度定义如下:

$$C = \frac{L_m - L_b}{L_m + L_b} \quad (1)$$

式中, C 为目标和背景对比度; L_m 为目标亮度,单位 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$; L_b 为背景亮度,单位 $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ 。

在电视系统成像的传输过程中,目标和背景的对比度经过大气传输、光学系统、探测器、信号处理、显示器等环节的调制后,被人眼接收实施对目标的探测与识别。因此,引入各环节的调制传递函数(MTF)。

MTF 是光学 OTF 的振幅部分。一个线性光学成像(或电子学)系统的光学传递函数(OTF)说明

如下:

1) 任何成像(或电子学)系统都有一个点(线)扩散函数,它使物面上的一个 δ 函数强度分布的输入信号,成像后变为一个弥散斑分布 $h(t)$;

2) 让该点(线)扩散函数对整个物场分布 $f(t)$ 进行逐点采样,则输出像场分布 $g(t')$ 等于 $h(t'-t)$ 与 $f(t)$ 放入卷积,即:

$$g(t') = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)h(t'-t)dt = f(t) \otimes h(t) \quad (2)$$

3) 根据傅立叶频谱理论,像频谱 $G(f)$ 等于物频谱 $F(f)$ 与系统线扩展函数频谱 $H(f)$ 的乘积,即:

$$G(f) = O(f)F(f) = (M(f)e^{-2\pi f t})F(f) \quad (3)$$

式中, $O(f)$ 是光学传递函数 OTF,它是调制传递函数 MTF 和位相传递函数 PTF 的乘积。其中,调制度 $M(f)$ 和 $P(f)$ 被分别定义为:

$$M(f) = \frac{I_{\max}(f) - I_{\min}(f)}{I_{\max}(f) + I_{\min}(f)} \quad (4)$$

$$P(f) = \exp(-2\pi f t) \quad (5)$$

式中, I_{\max} 表示辐射强度最大值; I_{\min} 表示辐射强度最小值。

通过上述成像过程可知,对于由 n 级子系统线性级联在一起的光电子成像系统,系统总的调制传递函数(MTF)是各子系统 MTF 的连乘,即:

$$M_{\text{Total}}(f) = M_1(f) \cdot M_2(f) \cdot M_3(f) \cdots M_n(f) \quad (6)$$

因此,在图 1 的目标背景对比度传递过程中,人眼最后观察到的目标与背景的对比度可由下式计算得出:

$$C = C_0 \times MTF_{\text{atmosphere}}(f) \times MTF_{\text{optical}}(f) \times MTF_{\text{detector}}(f) \times MTF_{\text{processor}}(f) \times MTF_{\text{display}}(f) \quad (7)$$

式中, C 为人眼处的对比度; C_0 为场景处目标和背景的对比度; $MTF_{\text{atmosphere}}(f)$ 为大气调制传递函数; $MTF_{\text{optical}}(f)$ 为电视光学系统调制传递函数; $MTF_{\text{detector}}(f)$ 为电视探测器调制传递函数; $MTF_{\text{processor}}(f)$ 为信号和电子处理调制传递函数; $MTF_{\text{display}}(f)$ 为显示器调制传递函数。

信号光经过大气信道传输时,受到大气气溶胶吸收、散射和大气湍流等影响,因此,大气调制传递函数 $MTF_{\text{atmosphere}}(f)$ 表示为:

$$MTF_{\text{atmosphere}}(f) = MTF_{\text{aerosol}}(f) \times MTF_{\text{turbulence}}(f) \quad (8)$$

式中, $MTF_{\text{aerosol}}(f)$ 表示大气气溶胶传递函数, $MTF_{\text{turbulence}}(f)$ 表示大气湍流调制传递函数。

由于气溶胶的截止频率很小,气溶胶 MTF 只会影响很低的空间频率,因此 $MTF_{\text{aerosol}}(f)$ 等于光谱平均大气透过率 $\tau_{\text{atmosphere}}(R)$ ^[10],即:

$$MTF_{\text{aero}}(f) = \tau_{\text{atmosphere}}(R) \quad (9)$$

从而,大气调制传递函数 $MTF_{\text{atmosphere}}(f)$ 计算公式如下:

$$MTF_{\text{atmosphere}}(f) = \tau_{\text{atmosphere}}(R) \times MTF_{\text{turbulence}}(f) \quad (10)$$

电视探测器调制传递函数 $MTF_{\text{detector}}(f)$ 计算公式如下:

$$MTF_{\text{detector}}(f) = MTF_x(f) \cdot MTF_y(f) = \frac{\sin(\pi\alpha f_x)}{\pi\alpha f_x} \cdot \frac{\sin(\pi\beta f_y)}{\pi\beta f_y} \quad (11)$$

式中, α, β 分别代表探测器在水平和垂直方向的空间张角。

信号和电子处理调制传递函数 $MTF_{\text{processor}}(f)$ 计算公式如下:

$$MTF_{\text{processor}}(f) = MTF_{\text{pre-amp}}(f) \cdot MTF_{\text{post-amp}}(f) \cdot MTF_{\text{filter}}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_e}{f_{3\text{dB}}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_e}{f_{3\text{dB}}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_e}{f_{3\text{dB}}}\right)^{2N}}} \quad (12)$$

式中, f_e 表示电信号频率; $f_{3\text{dB}}$ 分别代表前置放大器、后置放大器及电子滤波器等电子学电路的 3 dB 带宽。

显示器调制传递函数 $MTF_{\text{display}}(f)$ 计算公式如下:

$$MTF_{\text{display}}(f) = \text{sinc}(\pi\alpha_{\text{LED}}f) \quad (13)$$

式中, α_{LED} 表示显示器对人眼的空间张角。

$MTF_{\text{optical}}(f)$ 为电视成像系统光学系统调制传递函数,可采用 ZMAX 软件仿真得到。

根据公式(10)~(12)可计算出电视成像系统的光学系统到显示器的传递函数 $MTF_{\text{system}}(f)$ 为:

$$MTF_{\text{system}}(f) = MTF_{\text{optical}}(f) \times MTF_{\text{detector}}(f) \times MTF_{\text{processor}}(f) \times MTF_{\text{display}}(f) \quad (14)$$

从而,人眼最后观察到的目标与背景的对比度 C 为:

$$C = C_0 \times \tau_{\text{atmosphere}}(R) \times MTF_{\text{turbulence}}(f) \times MTF_{\text{system}}(f) \quad (15)$$

人眼观察显示器图像完成对目标的探测与识别,需要人眼最后观察到的目标与背景的对比度 C 不小于人眼阈值对比度 $CTF_{\text{EYE}}(f)$, 即:

$$C = C_0 \times \tau_{\text{atmosphere}}(R) \times MTF_{\text{turbulence}}(f) \times MTF_{\text{system}}(f) \geqslant CTF_{\text{EYE}}(f) \quad (16)$$

电视的最小可分辨对比度 $MRC(f)$ 的计算公式^[3]为:

$$MRC(f) = \frac{CTF_{\text{EYE}}(f)}{MTF_{\text{system}}(f)} \quad (17)$$

根据工程经验,人眼阈值对比度 $CTF_{\text{EYE}}(f)$ 取 $0.02^{[11]}$ 。根据电视成像系统的设计参数可以计算出 $MTF_{\text{system}}(f)$, 从而可以得出最小可分辨对比度 $MRC(f)$ 。

从而,电视成像系统能够探测、识别目标的条件为:

$$C_T = C_0 \times \tau_{\text{atmosphere}}(R) \times MTF_{\text{turbulence}}(f) \geqslant MRC(f) \quad (18)$$

式中, C_T 称为表观对比度; C_0 为场景处目标和背景的对比度; $\tau_{\text{atmosphere}}(R)$ 表示距离 R 传输路径的光谱平均大气透过率,该值可以用一些大气传输模型软件计算,比较常见的大气传输模型有: LOWTRAN、MODTRAN、HITRAN 和 FASCODE; $MTF_{\text{turbulence}}(f)$ 为大气湍流传递函数; R 表示探测、识别距离; $MRC(f)$ 为最小可分辨对比度,可以通过公式(17)理论计算得出,研制出电视成像系统实物以后可以通过测试设备测出实物的最小可分辨对比度(MRC)。

当不考虑大气湍流对电视成像系统作用距离的影响时,电视成像系统能够探测、识别目标的条件为:

$$C_T = C_0 \times \tau_{\text{atmosphere}}(R) \geqslant MRC(f) \quad (19)$$

3 大气湍流基本理论及其调制传递函数

工程应用中,一般使用大气折射率结构常数 C_n^2 和大气相干直径 r_0 这两个参数来分析大气湍流效应。由理论推导或实验数据计算得来的大气折射率结构常数 C_n^2 模型包括 Freid 预测模型、Brookner 预测模型、Tatarski 预测模型、Hufnagel 预测模型和 SLC-D 预测模型等^[12], 这些模型以地面高度为变量,适用于不同高度范围。对于直升机载电视成像系统,一般飞行高度较低(500 m 以内),适用 Tatars-

ki 模型进行描述^[13], 该模型适用于无云的晴朗天空,如下式所示:

$$C_n^2(h) = C_{n_0}^2 h^{-\frac{4}{3}} \quad (20)$$

式中, $C_{n_0}^2 = 4.16 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 。

为了在空间尺度描述大气湍流对光波波前扰动强度, Fried 提出了大气相干直径的概念。大气相干直径 r_0 与大气折射率结构常数密切相关,对于常检的球面波,大气相干直径 r_0 为:

$$r_0 = 0.185\lambda^{6/5} \left[\int_0^R \left(\frac{\eta}{R} \right)^{5/3} C_n^2(\eta) d\eta \right]^{-3/5} \quad (21)$$

式中, R 为从目标起测的倾斜路径长度; λ 为波段中心波长。

直升机载电视成像系统在高度 H 处对地面高度 1 m 的目标进行观察,倾斜路径为 R , 相对于垂直轴向上的观察角为 θ , 利用几何关系 $d\eta = [-R/(H-1)] dh$, 公式(21)可改为:

$$r_0 = 0.185\lambda^{6/5} \left[\frac{R}{H-1} \int_1^H \left(\frac{H-h}{H-1} \right)^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5} \quad (22)$$

大气湍流使大气像“沸腾”一样,目标的不同部位产生不同的畸变,畸变区域和强度随时间变化,对目标的探测和识别是非量化的。为了数学上表达方便,规定一个平均调制传递函数 MTF, 它使整个场景像质下降。近场、远场、长曝光和短曝光四种极限条件下的大气湍流 MTF 可以用解析式描述:

$$MTF_{\text{turbulence}} \approx \exp \left\{ -3.44 \left(\frac{1000\lambda f}{r_0} \right)^{5/3} \left[1 - \alpha \left(\frac{1000\lambda f}{D} \right)^{1/3} \right] \right\} \quad (23)$$

式中, λ 为波段中心波长(μm); D 为光学系统光瞳口径(m); f 为物空间角频率(cycle/mrad); r_0 为大气相干直径(m); α 为对应不同条件下的 Fried 修正因子。

将公式(20)和公式(22)代入公式(23)可得:

$$MTF_{\text{turbulence}} \approx \exp \left\{ -57.3 \times 10^5 R \lambda^{-1/3} f^{5/3} (H-1)^{-8/3} \cdot C_{n_0}^2 \left[1 - \alpha \left(\frac{1000\lambda f}{D} \right)^{1/3} \right] \int_1^H (H-h)^{5/3} h^{-4/3} dh \right\} \quad (24)$$

直升机载电视成像系统需要对地面目标远距离成像观察,曝光时间小于 10 ms, 并且 $(R\lambda)^{1/2} > D$, 属于远场短曝光模式,根据 Fried 建议 α 值取 0.5。因此,大气湍流调制传递函数为:

$$MTF_{\text{turbulence}} \approx \exp\{-57.3 \times 10^5 R \lambda^{-1/3} f^{5/3} (H-1)^{-8/3} \cdot C_{n_0}^2 [1 - 0.5 (\frac{1000 \lambda f}{D})^{1/3}] \int_1^H (H-h)^{5/3} h^{-4/3} dh\}$$

(25)

式中： λ 为波段中心波长 (μm)； D 为光学系统光瞳口径 (m)； f 为物空间角频率 (cycle/mrad)； r_0 为大气相干直径 (m)， R 为从目标起测的倾斜路径长度 (m)， H 为观察高度 (m)， $C_{n_0}^2 = 4.16 \times 10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ 。

4 大气湍流对电视作用距离影响分析

为了验证大气湍流对直升机载电视成像系统作用距离的影响，针对无大气湍流和有大气湍流条件，对电视成像系统的探测距离和识别距离指标进行仿真计算分析。某型直升机载电视成像系统的工作波段为 $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 近红外波段，取该波段的中心波长 $\lambda = 0.8 \mu\text{m}$ ，光学系统光瞳口径 $D = 64 \text{ mm}$ 。使用最小可分辨对比度 (MRC) 测试设备测得电视成像系统的 MRC 曲线如图 2 所示。

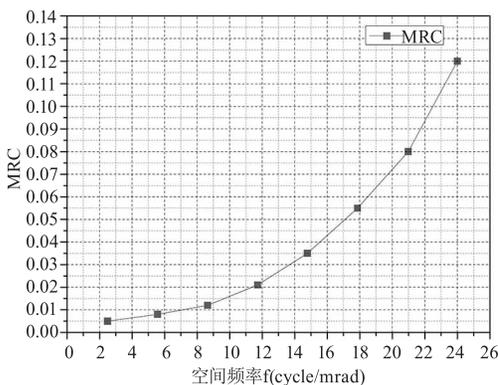


图 2 电视成像系统的 MRC 曲线

Fig. 2 MRC curve of television imaging system

要完成对目标的探测和识别，首先要满足传感器空间分辨率的要求。根据约翰逊准则，50% 概率下对目标探测需要目标在电视成像系统的成像为 1 对线，50% 概率下对目标识别需要目标在电视成像系统的成像为 4 对线，目标尺寸、距离与空间角频率的关系如公式 (26) 所示，根据该式可以将空间角频率转换为距离：

$$R = \frac{f \cdot L}{n} \tag{26}$$

式中， R 表示距离； f 表示物空间角频率； L 表示目标尺寸； n 表示探测和识别的线对，探测为 1，识别为 4。

按照目标尺寸 $L \times L = 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ，目标背景对比度 $C_0 = 0.33$ ，观察高度 $H = 100 \text{ m}$ ，能见度 23 km 条

件，使用 MODTRAN 软件计算 $0.7 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 近红外波段光谱平均大气透过率 $\tau_{\text{atmosphere}}(R)$ ，根据公式 (18)、公式 (19)、公式 (25) 和公式 (26) 分别计算得出有大气湍流和没有大气湍流的表现对比度，分别绘制有大气湍流和没有大气湍流的表现对比度与探测 MRC、识别 MRC 的关系曲线如图 3、图 4 所示。

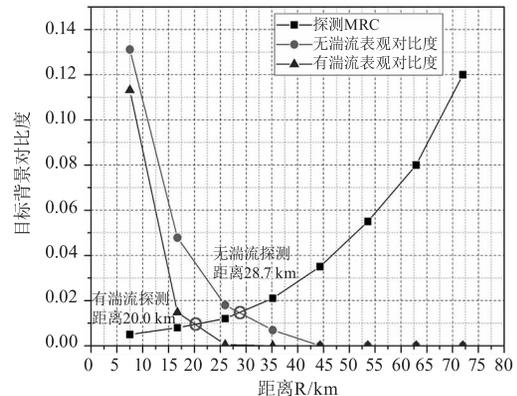


图 3 表现对比度与探测 MRC 的关系曲线

Fig. 3 relationship curve between apparent contrast and MRC of detection

图 3 中有大气湍流和没有大气湍流的表现对比度与探测 MRC 曲线的交点即为有大气湍流的探测距离和没有大气湍流的探测距离。从图 3 中可以看出，没有大气湍流的探测距离为 28.7 km ，有大气湍流的探测距离为 20.0 km 。

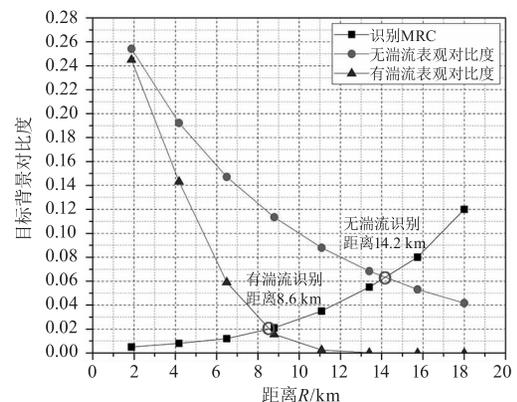


图 4 表现对比度与识别 MRC 的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between apparent contrast and MRC of recognition

图 4 中有大气湍流和没有大气湍流的表现对比度与识别 MRC 曲线的交点即为有大气湍流的识别距离和没有大气湍流的识别距离。从图 3 中可以看出，没有大气湍流的识别距离为 14.2 km ，有大气湍流的识别距离为 8.6 km 。

从图 3 和图 4 的分析结果可以看出，有大气湍

流影响的情况下机载电视成像系统的探测距离下降了30.3%、识别距离下降了39.4%，由此可见大气湍流对机载电视成像系统的作用距离性能影响特别明显。

5 结论

本文对目标和背景光学信号传输成像机理进行了分析,建立了包含大气湍流效应的基于MRC的电视成像系统作用距离模型,对大气湍流基本理论进行分析,分析出适用于直升机载电视成像系统的大气折射率结构常数,给出了大气相干直径计算方法,建立了大气湍流调制传递函数,以某型直升机载电视成像系统为例,对大气湍流效应对电视成像系统作用距离的影响进行仿真分析,大气湍流影响的情况下机载电视成像系统的探测距离下降了30.3%、识别距离下降了39.4%,大气湍流效应严重影响了直升机载电视成像系统的作用距离性能,在直升机载电视成像系统作用距离指标论证时,必须考虑大气湍流带来的影响,使指标论证更加准确、更加贴近实际使用环境。

参考文献:

- [1] Rao Ruizhong. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. (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.
- [2] Jin Weiqi, Gao Shaoshu, Wang Jihui, et al. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6): 1552 - 1556. (in Chinese)
金伟其, 高绍姝, 王吉晖, 等. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型 [J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1552 - 1556.
- [3] Bu Jiwei, Wang Jianxia. Application of the minimum recognizable contrast in airborne CCD television system [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(10): 64 - 68. (in Chinese)
卜纪伟, 王建霞. 最小可分辨对比度在机载电视系统中的应用研究 [J]. 电光与控制, 2011, 18(10): 64 - 68.
- [4] 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.
- [5] Fried D L. Limiting resolution looking down through the atmosphere [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1380 - 1384.
- [6] Goodman J W. Statistical optics [M]. Washington: John Wiley & Sons, Inc, 1985.
- [7] Roggemann M C, WELSH B. Imaging through turbulence [M]. New York: CRC Press, 1996.
- [8] Zhang Xiaofang, Yu Xin, Yan Jixiang. Influence of atmospheric turbulence on image resolution of optical sensing system [J]. Optical Technique, 2005, 31(2): 263 - 265. (in Chinese)
张晓芳, 俞信, 阎吉祥. 大气湍流对光学系统图像分辨力的影响 [J]. 光学技术, 2005, 31(2): 263 - 265.
- [9] Wu Xiongxiang, 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. (in Chinese)
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.
- [10] Gerald C. Holst. Electro-optical imaging system performance (6th ed) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 74. (in Chinese)
杰拉德·C. 霍尔斯特. 光电成像系统性能 (6版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 74.
- [11] Deng Shuyi, Xü Zhimin. Modulation transfer function of human visual system [J]. Acta Armamentarii, 1982, 2: 24 - 33. (in Chinese)
邓述移, 徐智敏, 杜连芳, 等. 人眼调制传递函数 [J]. 兵工学报, 1982, 2: 24 - 33.
- [12] Liang Hongxia. Dynamic simulation of airborne infrared imaging system in complex meteorological environment [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
梁红霞. 复杂气象环境下机载红外成像系统动态仿真研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [13] Tatarski V I. Wave propagation in a turbulent medium [M]. USA: Courier Dover Publications, 2016.