应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,CSCD等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

航空光电侦察图像质量影响因素分析

王惠林 刘吉龙 吴雄雄 栾亚东

Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection

WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongxiong, LUAN Yadong

引用本文:
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. DOI: 10.5768/JAO202142.0502001
WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongxiong, et al. Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 817-829. DOI: 10.5768/JAO202142.0502001

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202142.0502001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

影响光电侦察系统目标定位精度因素分析

Analysis and study on influence factors of target geo-locating accuracy for electro-optical reconnaissance system

应用光学. 2018, 39(1): 1-6 https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101001

结合视觉注意力机制和图像锐度的无参图像质量评价方法

No-reference image quality assessment method based on visual attention mechanism and sharpness metric approach

应用光学. 2018, 39(1): 51-56 https://doi.org/10.5768/JAO201839.0101009

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

光学图像伪装效果评估研究现状及关键问题

Research status and key issues of optical image camouflage effectiveness evaluation

应用光学. 2019, 40(6): 1050-1058 https://doi.org/10.5768/JAO201940.0602002

AOTF成像光谱仪声光晶体光谱传递函数的研究

Study on spectral transfer function based on dual AOTF acousto-optic crystal

应用光学. 2019, 40(2): 202-209 https://doi.org/10.5768/JAO201940.0201004

50 mm ~ 1 000 mm大变倍比变焦光学系统设计

Design of 50 mm~1 000 mm zoom optical system with high zoom ratio

应用光学. 2020, 41(6): 1147-1152 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0601002

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号：1002-2082 (2021) 05-0817-13

航空光电侦察图像质量影响因素分析

王惠林，刘吉龙，吴雄雄，栾亚东

（西安应用光学研究所，陕西 西安 710065）

摘　要：从航空光电侦察系统的实际需求，首先图像信息的角度研究图像质量优劣的定性和定量因素，提出一种基于相似特征区域提取的图像清晰度评价方法，使得图像清晰度的主观感受与客观评价相匹配。其次从成像系统的光学评价角度分析影响成像质量的光学传递函数、像差、透过率等因素及其相互关系，然后依据多波段长焦反射式光学系统进行试验结果验证。最后，结合工程实践提升成像质量的要求，指出光学成像系统研制中应重点关注的几个方面，并针对多波段长焦反射式光学系统，给出具体参数建议。

关键词：图像质量；图像清晰度；光学评价；光学传递函数

中图分类号：TN206　　文献标志码：A　　**DOI:** 10.5768/JAO202142.0502001

Image quality influencing factors for aerial electro-optical detection

WANG Huilin, LIU Jilong, WU Xiongxiong, LUAN Yadong

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

Abstract: For the actual demands of the aerial electro-optical detection system, firstly, the qualitative and quantitative factors for evaluating the optical image quality were analyzed from the perspective of image information, an image definition evaluation method based on similar feature region extraction was proposed to achieve the matching between the subjective feeling and objective evaluation of the image definition. Then, from the perspective of the optical evaluation of imaging system, the optical transfer function, aberration, transmittance and other factors affecting the imaging quality were analyzed, and according to the multi-band long focal reflective optical system, the experimental results were verified. Finally, combined with the requirements for engineering practice to improve the imaging quality, several aspects that should be given more attention in the development of optical imaging system were pointed out. And for the multi-band long focal reflective optical system, some specific parameter suggestions were given.

Key words: image quality; image definition; optical evaluation; optical transfer function

引言

近年来航空光电侦察系统主要采用多波段长焦反射式光学系统设计形式，具有时效性强、准确度高、侦察距离远、机动性灵活等特点，是目前获取战术情报的重要手段之一[1-3]。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监视系统、Goodrich 公司的 DB110 相机、ROI 公司的 CA295 相机等[4-6]。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研发大多都是在国外的研究基础上开展。在航空光电侦察系统的研制过程中，光学系统输出的图像质量是评价系统优劣的直观因素，因此，一直以来，光电侦察系统的成像质量是设计师、制造者、测试者和使用者关注的焦点。在工程实践中，图

收稿日期：2021-03-17；　修回日期：2021-04-08

基金项目：空军预研课题

作者简介：王惠林（1971—），男，硕士，研究员，博士生导师，主要从事机载光电总体方面的研究。

E-mail: wanghuilin1971@sina.com

通信作者：吴雄雄（1992—），男，博士，高级工程师，主要从事光学设计方面的研究。E-mail: wuxx1992yygx@126.com

像质量评价包括主观评价和客观评价[7-8]。主观评价经常用到的是观察者的主观感受，由于个体差异，评价客观性和准确性不强。客观评价采用图像信息参数、光学参数、系统参数等可量化的物理参数，客观性强，但对非专业人员（尤其是使用者）不直观，而且经常出现客观测量指标达标，但主观感觉图像质量不好。例如，衡量光电侦察监视系统的重要指标——探测识别距离、最小可分辨温差、地面分辨力等都达标，但图像整体蒙了一层“薄纱”，主观感觉不佳。基于该问题，设计师、制造者、测试者和使用者不禁产生疑问：现在的主流客观量化评价指标能否全面准确反映系统成像质量？而且，设计师思考的另一个问题是：设计中应该重点关注哪些因素，以使客观评价指标与主观感觉更匹配？本文针对上述问题，以多波段长焦距光学系统获取图像为例，从图像清晰度和光学评价参数两方面详细分析了图像质量评价标准，以期对光学成像系统工程研制和生产过程质量控制提供参考依据。

1 图像质量评价标准

一方面，图像质量评价标准与光学成像系统应用目的关系密切，不同应用场合的光学成像系统，其最佳性能设计准则和评价标准也不同，如用于点源目标探测的红外搜索跟踪系统，为取得基于信噪比的最远探测能力[9]，光电系统的最优设计参数为 $F\lambda/d$=1.1。对于面源目标识别的侦察监视系统，为取得最佳远距目标细节辨识能力[10]，光电系统的最优设计参数为 $F\lambda/d$<1.0，所以很难得出适合不同应用场合的图像质量唯一评价标准。

这里，我们从寻求与主观感受匹配的图像客观评价方法角度，探索一般意义上光电成像系统输出图像质量的评价准则。基于此，图像质量评价标准应满足以下几项要求[11]：1）可量化 使设计师通过优化设计参数追求最佳性能；2）可测量 使评价者通过测量结果评价系统性能；3）客观性 含义客观明确；4）连续性 量化表达连续，而非独立的“优”/“劣”评价；5）匹配性 反应性能的设计计算结果与主客观测量结果匹配；6）不受目标场景、光学相干度影响；7）正确反映评价边界条件。

另一方面，图像质量本身是一个主观概念，把光学成像系统采样复现的目标场景通过显示器显示出来供人眼观察，观察者把图像从优到劣进行分级，要求观察者经过一定的训练，同时也与天气环境、光学系统、探测器、显示器、人眼、大脑等因素密切相关。由于受到一系列主客观因素的影响，不同目标（即便同一目标）不同时刻成像结果存在差异，因此，对图像质量的评价没有绝对的衡量标准。业界对图像质量的评价主要包括：成像系统（包括光学镜头、探测器、显示器）调制传递函数（modulation transfer function, MTF）、等价通带宽度、图像清晰度、光学系统波像差、斯特列尔比等客观参数和感官分辨力、主观质量因子（subjective quality fact, SQF）、调制传递函数面积（modulation transfer function area, MTFA）、平方根积分、瞄准任务性能（target task performance, TTP）等主客观融合参数[11-12]。本文主要从图像清晰度和光学参数评价两方面对图像质量评价标准进行研究。

2 图像清晰度评价方法与试验

2.1 图像清晰度评价函数

图像清晰度是评价图像质量的重要标准，清晰度的评价方法涉及图像分析、人的主观认知方式、模糊数学、人工智能等领域。现有图像清晰度评价方法大多建立在图像边缘或信息熵的统计基础上，基于此，图像清晰度可近似为图像细节保真度，即目标细节在图像上复现越多（高分辨力），图像灰度变化越剧烈（高对比度），则图像越清晰，据此提出的图像清晰度评价函数主要分为 3 大类：基于空域特征的图像评价函数（如梯度函数）、基于频域特征的图像评价函数（如离散傅里叶变换函数）和基于统计特性的图像评价函数（如熵函数），而这些评价函数通用评价能力可分为相对清晰度评价能力（对同一内容图像不同模糊程度的评价，主要考察随图像模糊程度加深而表现的单调无偏性和灵敏度）和绝对清晰度评价能力（对不同内容图像不同模糊程度的评价，主要考察是否能够给出与图像本身内容无关的客观评价结果）。研究表明，现行图像清晰度评价函数可以具备相对清晰度评价能力，但还不能对不同内容图像模糊程度给出于主观感受一致的客观评价结果[13]，所以本文的图像清晰度评价研究工作主要围绕相对清晰度评价展开。

为探索一种使主观感受与客观评价相匹配的图像清晰度评价方法，本文选取了现行 3 类图像清晰度评价函数中的 13 种进行研究，包括基于空域

特征的图像评价函数 9 种(能量梯度函数、Roberts 函数、Tenengrad 函数、Brenner 函数、Variance 函数、Laplace 函数、SMD 灰度梯度函数、SMD2 灰度梯度乘积函数、PVA 点锐度函数)、基于频域特征的图像评价函数 2 种(DFT 二维离散傅里叶变换函数、DCT 离散余弦变换函数)和基于统计特性的图像评价函数 2 种(熵函数、自相关 Vollaths 函数)。

首先验证 13 种图像评价函数的单调无偏性和灵敏度。采用不同模糊程度的 15 幅高斯模糊图像作为分析对象, 模拟从离焦到聚焦、再到离焦的过程(模糊半径 blur radius 分别取为 7, …, 1, 0, 1, …, 7, 总共 15 幅图像)。如图 1 所示, 每幅图像的分辨率像素均为 960×730。分别利用上述 13 种清晰度评价函数进行图像清晰度计算, 归一化的评价结果如图 2 所示。

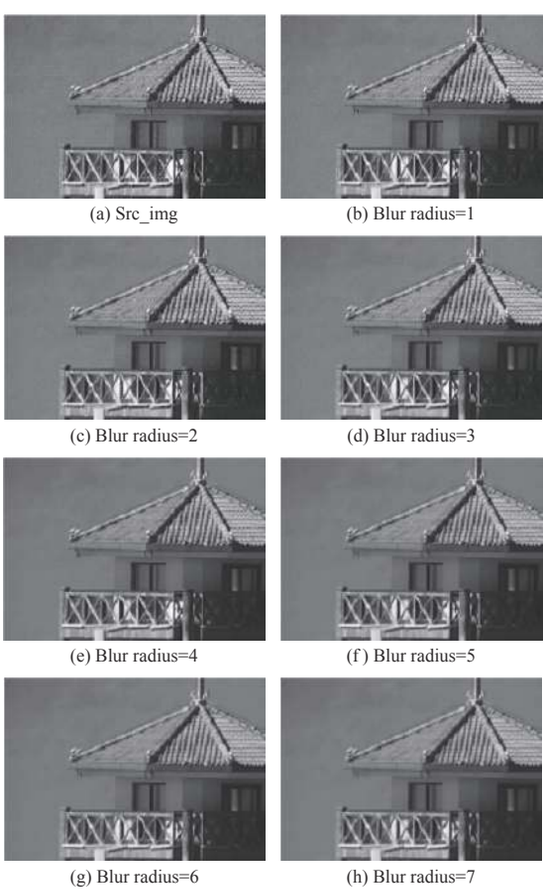


图 1　利用高斯滤波器产生的模糊图像序列

Fig. 1　Blurred image sequence generated by Gaussian filter

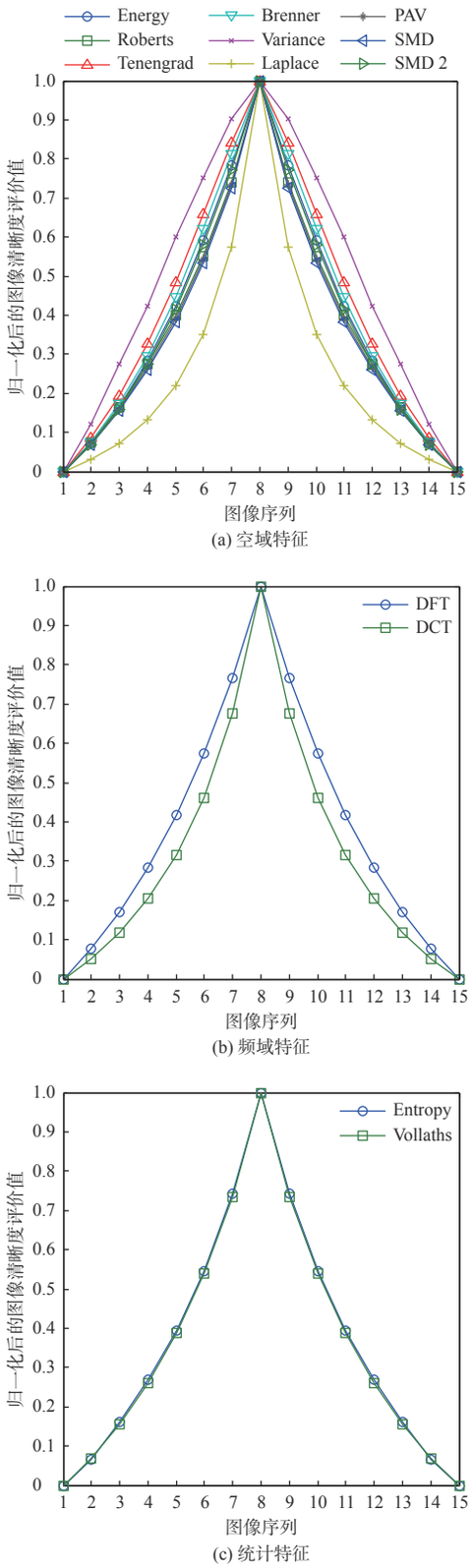


图 2　归一化清晰度评价值

Fig. 2　Normalized value of definition evaluation

由图 2 可以看出, 各清晰度评价函数均具有良好的无偏性和单调性, 正确反应了图像序列的清晰程度。基于频域特征和统计特征的清晰度评价方法灵敏度相当; 基于空间特征的图像清晰度评价函数中, Laplace 函数对图像清晰度的灵敏度最

高，且优于基于频域特征和统计特征的各清晰度评价函数，Variance 函数的图像清晰度评价方法灵敏度最差。

在上述离焦仿真图像对比评价实验基础上，我们首先采用 3 套不同的多波段长焦反射式光学系统采集真实场景图像（3 套光学系统焦距、口径、*F* 数、工作波段、探测器设计要求一致，属于同一要求下的 3 套不同设计方案的样机实现，且实验时采用相同探测器组件、显示器和观察人员对同一目标场景成像观察，但由于需要更换同一探测组件，3 套样机观察时间段之间有 40 min～60 min 左右的差异），然后对采集到的真实图像使用清晰度评价函数进行对比分析。图 3 所示为分别采用 3 套样机进行的成像对比实验，图像从左至右依次对应第 1 套样、第 2 套样机、第 3 套样机的成像效果。图 4 所示为使用清晰度评价函数进行图像清晰度计算结果。

(a) 第1套 (b) 第2套 (c) 第3套

图 3 3 套不同样机对同一目标场景成像效果

Fig. 3 Imaging effect of three different cameras on same target scene

图 4(a)、4(b)和 4(c)分别给出了基于空间特征、频域特征和统计特征 13 种图像清晰度评价函数对目标场景图像归一化清晰度评价值。由图 4 可以看出，13 种函数评价结果分散性较大（统计结果如表 1 所示），不能正确匹配反映人眼对图像观察的主观感受（现场观察者主观评价结果：3>2>1）。分析认为，造成上述结果的主要原因在于两方面：一是图像间存在光照强度和目标场景差异；二是图像中存在的噪声“污染”了图像特性，从而造成客观评价结果不能正确反应图像清晰度。

为使图像清晰度客观评价指标能够正确反映人眼的主观感受，降低背景、光照差异和噪声影响，我们提出基于相似特征区域提取的图像清晰度评价方法。首先利用相同的滤波模型对各图像进行适当去噪处理，然后利用梯度过滤和相似度检测提取图像间相似度最大的区域，最后再进行清晰度函数评价。

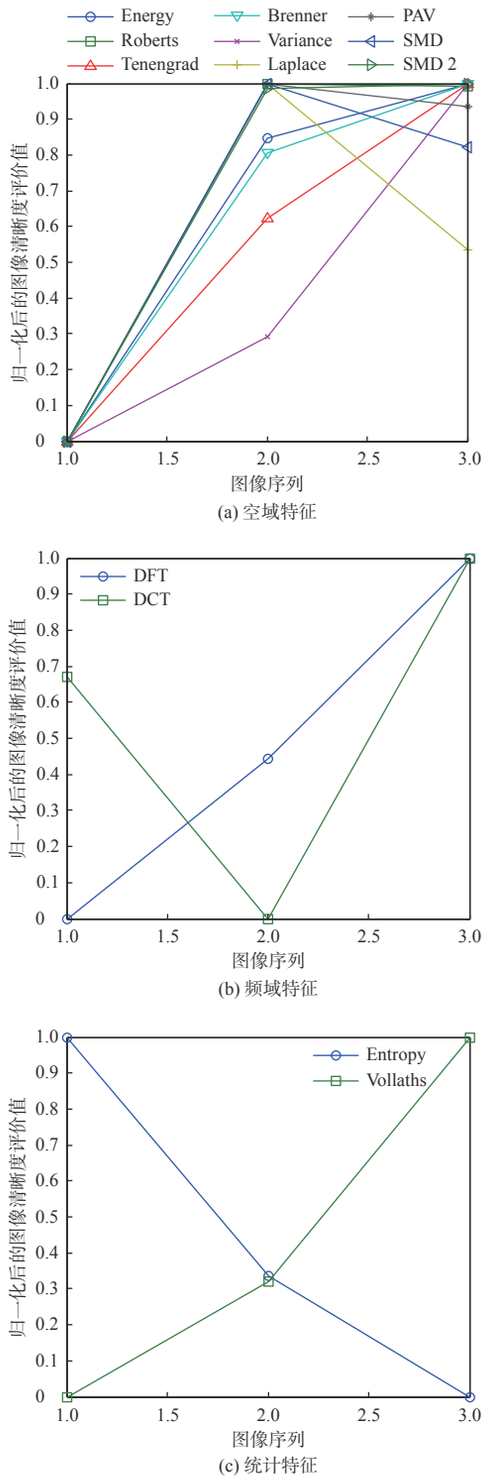


图 4 归一化清晰度评价值

Fig. 4 Normalized value of definition evaluation

表 1 13 种函数评价结果

Table 1 Evaluation results of thirteen functions

评价结果	3>2>1	2>3>1	3>1>2	1>2>3
评价函数统计	7种函数	4种函数	1种函数	1种函数

图 5 所示为最佳图像相似区域自动检测原理。基于高斯滤波进行降噪后，将图像分割为 $M\times N$ 个子图像块，利用平均能量梯度阈值过滤单一背景图像块，然后利用图像直方图检测计算剩余对应图像块间的余弦相似度，并将余弦相似度最大的图像块作为最佳相似区域。

具体地，为降低噪声对图像清晰度评价的影响，利用二维高斯滤波器对图像进行降噪处理：

$$G(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \tag{1}$$

$$H(x,y)=F(x,y)\otimes G(x,y) \tag{2}$$

式中：$G(x,y)$为二维高斯卷积核；$F(x,y)$和$H(x,y)$分别为原始图像和降噪后的图像；“⊗”表示卷积运算。然后，将各降噪后的图像$H(x,y)$平均分割为 $M\times N$ 个子图像集，并依次计算各图像间对应每个子图像$I_{i,j}$($i\in[1,2,\cdots,M]$, $i\in[1,2,\cdots,N]$)的平均能量梯度$D_{\text{arg}}^{i,j}$：

$$D_{\text{arg}}^{i,j}=\frac{\sum_x\sum_y\left(\left|I_{i,j}(x+1,y)-I_{i,j}(x,y)\right|^2+\left|I_{i,j}(x,y+1)-I_{i,j}(x,y)\right|^2\right)}{m\times n} \tag{3}$$

式中：$m\times n$ 为子图像$I_{i,j}$的大小。如果该子图像的平均能量梯度$D_{\text{arg}}^{i,j}$小于阈值$D_{\text{threshold}}$，则该子图像为单一背景图像块，并从图像集中删除(如图 5 中“×”所示区域)。依次类推，利用平均能量梯度阈值过滤图像集中的所有单一背景图像块。

最后，计算所有剩余对应子图像间的余弦相似度。首先计算子图像的灰度直方图，并将每 4 个连续的灰度等级作为 1 个分量将 256 个 bins 的子图像灰度直方图划分为 64 区，生成该图像的一个灰度直方图向量。由两个对应子图像的直方图向量 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$，则可得图像间的余旋相似度为

$$\text{Similarity}=\frac{\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{B}}{\|\boldsymbol{A}\|\cdot\|\boldsymbol{B}\|}=\frac{\sum_{i=1}^{k}A_i\times B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{k}(A_i)^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{k}(B_i)^2}} \tag{4}$$

式中：A_i和B_i分别为灰度直方图向量的各分量；k 为向量维度(即 64)；“·”为点积运算。依次计算所有对应子图像间的余弦相似度，并将余弦最大的图像块作为最佳相似区域。

图 6 所示为对图 3 中的序列图像进行最大相似区域检测的结果(红色方框区域所示)，其中目标场景图像分割为 3×4(3 行 4 列)个子图像块，最佳相似区域为第 8 个图像块，即位于第 2 行第 4 列。

图 7 所示为基于相似区域检测的图像清晰度评价方法对图 3 中的图像序列进行清晰度评价的结果(统计结果见表 2)，结果显示：图像序列中图像 3 的清晰度最高；图像 2 次之；图像 1 清晰度最差。对比表 1 和表 2 可以看出：通过对图像最佳相似区域进行检测，降低了图像背景差异、图像间不

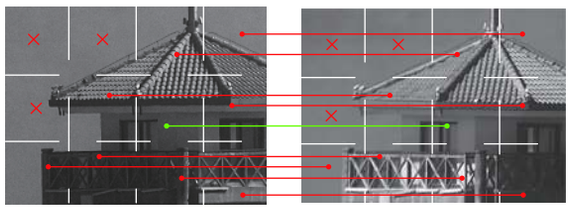


图 5　最大图像相似区域自动提取原理

Fig. 5　Principle of automatic extraction of maximum image similar region

(a) 第1套　(b) 第2套　(c) 第3套

图 6　图像序列最大相似区域检测结果

Fig. 6　Test results of maximum similar region in image sequence

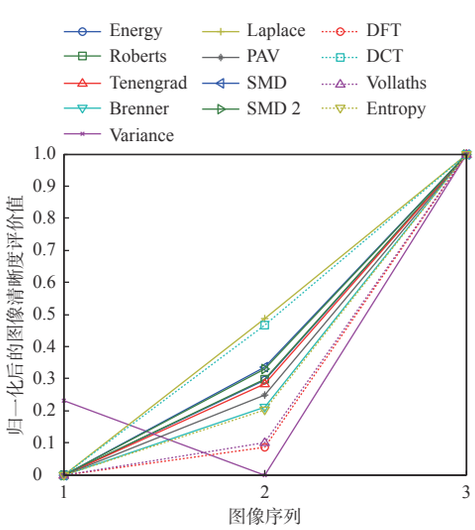


图 7　基于相似区域检测的图像清晰度评价结果

Fig. 7　Image definition evaluation results based on similar region detection

表 2　基于相似区域检测 13 种函数评价结果

Table 2　Evaluation results of thirteen functions based on similar region detection

评价结果	3>2>1	3>1>2	2>3>1	2>1>3	1>2>3	1>3>2
评价函数统计	12种函数	1种函数	–	–	–	–

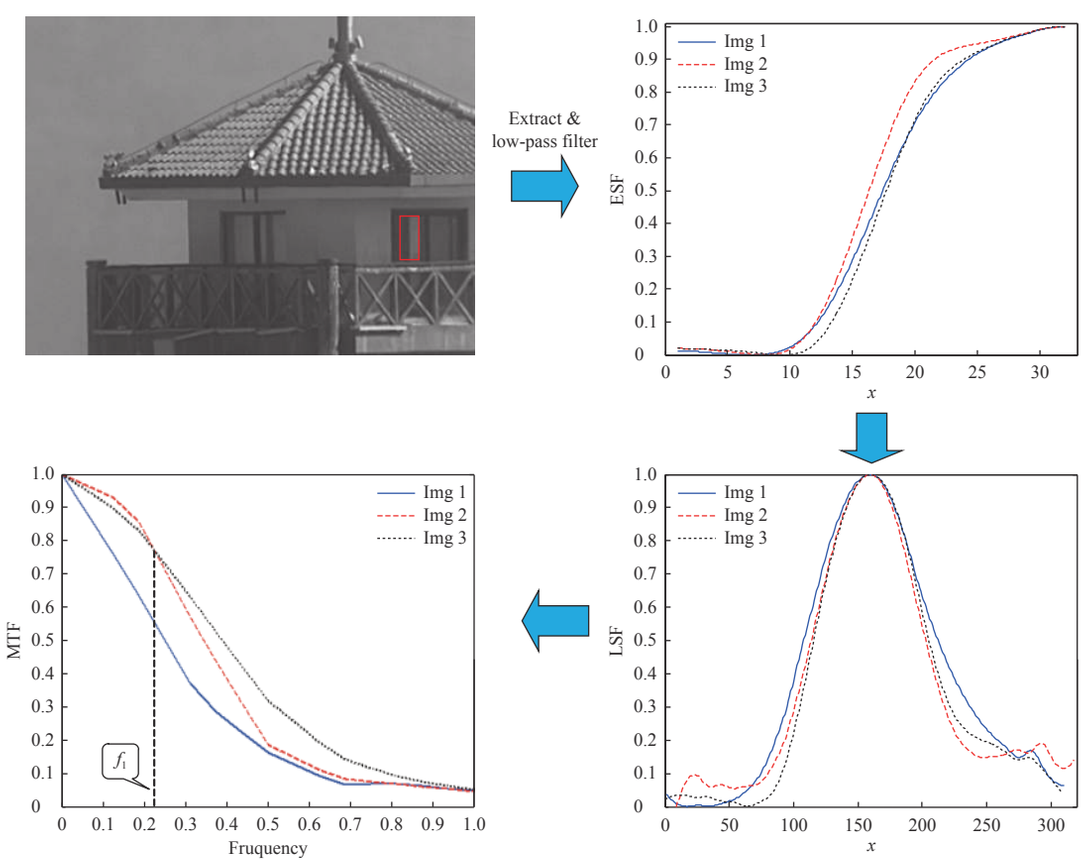
同光照条件和噪声对图像特性的影响，13 种评价函数的评价结果分散性明显改善，且与人对图像观察的主观感受一致。

上述方法和试验结果完善后，可以考虑应用到批量制造的光学成像产品出厂检验中。例如，可以选取一台评价较好的产品作为检测标准，其他产品与标准产品进行相同目标的成像对比，设定图像清晰度检测阈值，将上述方法固化到产品出厂自动检测流程中，从图像信息特性给出批量产品外场使用成像质量一致性的定量评价方法。

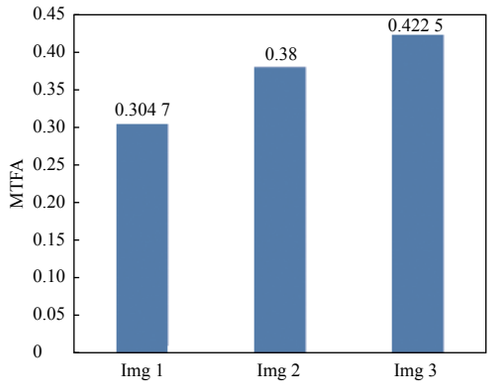
2.2　基于试验图像的 MTF 计算分析

图像的 MTF 是表征图像质量比较综合、客观、准确的指标。接下来，我们计算分析光学系统采集图像的 MTF。从图 3 序列图像中选取符合条件的刃边图像，然后获取刃边图像的边缘扩展函数（ESF），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（如图 8(a)所示）。通常，由于根据倾斜边缘提取的 ESF 曲线分辨率不足，需要对根据倾斜边缘提取的 ESF 曲线进行超分辨率插值，从而获取更加精准的 ESF 曲线。

需要说明的是，此处求解的 MTF 是成像系统 MTF_{sys}（注：$MTF_{sys}=MTF_{optics} \times MTF_{detector}$）[14]，考虑试验中 3 套光学成像系统采用相同探测组件（即 $MTF_{detector}$ 一致），所以 MTF_{sys} 也反映了光学系统传递函数 MTF_{optics}。从图 8 可以看出，第 2、3 套成像系统性能接近，并优于第 1 套成像系统。从图 8(a)可以看出，当空间频率小于 f_1 时，虽然第 2 套成像系统 MTF 优于第 3 套成像系统 MTF，但从梯度函数定义的图像清晰度来说，第 3 套成像系统优于 2 套成像系统，实际上，早在 20 世纪 50 年代，Wolf 等人通过试验已经发现，对于成像光学系统，图像分辨力和清晰度成弱相关，也就是说，分辨力高并不代表图像清晰度高[11]。



(a) 图像序列MTF求解过程



(b) 对应的MTFA结果

图 8　MTF 求解和对应的 MTFA 结果

Fig. 8　MTF solution and corresponding MTFA results

从图 8(b)可以得出, 第 3 套成像系统 MTFA 大于第 2 套成像系统。从严格意义上讲, MTFA 表示系统 MTF 和接收器噪声等效调制度 NEM(对于人眼观察, NEM 则对应人眼对比度阈值函数 CTF)界定的面积, 由于采用相同的观测人员和观测环境, 所以此处统计的 MTFA 未考虑 CTF 影响, 为 MTF 曲线与横纵坐标界定的面积, 仅以此对比 3 套成像系统 MTFA 相对关系。根据 20 世纪 70 年代 Snyder 的试验结论: 随着 MTFA 的增大, 图像质量提升, 且 MTFA 评判方法适用于嵌入在噪声中的目标探测任务, 即军事目标探测任务[12]。综上所述, 无论从图像清晰度, 还是 MTF 角度来说, 我们可以得出, 第 3 套成像系统成像质量优于第 2 套, 且都优于第 1 套成像系统。

3　光学参数评价方法与试验

3.1　光学 MTF 的特点及与透过率、波像差、离焦、杂光的关系

如前所述, 图像质量评价包含了成像系统(包括光学镜头、探测器、显示器)调制传递函数(MTF)、等价通带宽度、图像清晰度、光学系统波像差、斯特列尔比等客观参数和感官分辨力、主观质量因子(SQF)、调制传递函数面积(MTFA)、平方根积分(SQRI)、瞄准任务性能(TTP)等主客观融合参数, 提出了图像质量评价标准应该具备的特点。从中可以看出, 无论是图像质量评价的客观参数, 还是主客观融合参数, 现行的图像质量评价方法均与光学系统 MTF 关系密切。实际上, 光学传递函数(OTF)符合第 2 节所述图像质量评价标准的要求, 并在像质检验上广泛应用, 其他像质判据不过是 OTF 某一方面的内容, 或可由 OTF 派生而来, 需要说明的是, 在实际像质评价时, 构成 OTF 的相位传递函数 PTF 较少采用, 原因有二: 一是通常我们更关心中低频响应, 此时 PTF 很小; 二是 PTF 描述不同空间频率目标在像面上成像位置的变化, 更灵敏的反应是使 MTF 下降, 而 MTF 描述目标成像对比度变化, 因此一般均采用 MTF 代表 OTF 进行光学系统像质评价。在实际工作中, 我们也经常使用星点、目视分辨率、波像差、畸变(由于光学畸变不影响成像清晰度, 故在此不做重点分析)等检测手段衡量光学系统优劣, 表 3 列出 MTF 与它们之间的特点对比。

表 3　MTF 与星点、目视分辨率、波像差等检测方法之间的特点对比

Table 3　Comparison of features between MTF and star point, visual resolution, wave aberration and other test methods

像质检测方法	特点	与MTF检测法对比
星点法	空间域目标信息描述, 可进行衍射限系统所成星点像光强分布与实际系统星点像光强分布比较; 难以定量测量, 对轴上球差不灵敏[15]; 直观, 简便。	频率域目标信息描述, 可定量测量, 通过比较实测值与理论值差异可鉴别不同像差影响[11]。
目视分辨率法	反映截止频率附近的像质情况, 直观, 简便, 可定量; 难以获得低频信息, 受测试者主观因素影响大[15]。	低频信息到高频信息的连续反映, 不受主观因素影响; 测量相对复杂。
波像差法	单色光测量, 表征图像清晰度不直观, 测量精度高, 可反映装调的微小误差及镜面变形, 反映不同像差, 求解装调问题[16]。	复色光测量, 客观、灵敏、定量的像质评价手段。

当然, MTF 还受像面位置、视场、F 数、方位(子午、弧矢)、工作波长以及环境等因素的影响, 在测量和对比时, 应注明测试条件, 避免无效测量对比。另外, 在工程设计中, 由于任务需求、使用环境和可供选择的探测器件等原因, 总体上一般已经规定了光学成像系统的工作波段、视场、光学口径、焦距等参数, 并选定了探测器, 在此限制条件下, 要想设计一个好的光学成像系统, 设计者可以操控的光学因素包括了光学结构形式、光学透过率、焦面位置、光学元件材料和面型精度、杂光系数、光学波像差、光学 MTF 等, 这些因素可归结为光学透过率、波像差、离焦量、杂光系数对光学 MTF 的影响。接下来的重点就是论述光学透过率、波像差、离焦量、杂光系数与光学 MTF 的影

响关系(注:本文重点描述实验室成像光学静态MTF,故不考虑动态条件下像移、振动等对MTF影响,可参考相关文献[12][17])。

3.1.1 光学透过率和MTF的关系

光学透过率(也称透射比)反映了光能量经过光学系统后的损失程度,与光学零件表面反射和光学材料内部吸收有关,是工作波长的函数,影响成像光学系统像面照度,进而影响成像对比度、信噪比、零频率传递函数值。一般光学系统用归一化的光学传递函数进行评价。归一化传递函数是由传递函数除以零频率传递函数值得到,接下来具体推导归一化传递函数与光学透过率的关系。

光学传递函数是光学成像系统点扩散函数的傅里叶变换,而点扩散函数可通过光瞳函数傅里叶变换后模的平方得到,即:

$$PSF(x,y)=\left|\iint OPF(\xi,\eta)\exp[-\mathrm{i}2\pi(\xi x+\eta y)]\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta\right|^2 \tag{5}$$

$$OTF(s,t)=\iint PSF(x,y)\exp[-\mathrm{i}2\pi(xs+yt)]\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{6}$$

式中:$OPF(\xi,\eta)$为光瞳函数[18],定义为

$$OPF(\xi,\eta)=\begin{cases}\tau(\xi,\eta)\exp[-\mathrm{i}kW(\xi,\eta)] & \text{点}(\xi,\eta)\text{在光瞳内}\\ 0 & \text{点}(\xi,\eta)\text{在光瞳外}\end{cases} \tag{7}$$

式中:(ξ,η)是光瞳坐标;$W(\xi,\eta)$是光学系统波像差,$\tau(\xi,\eta)$是光瞳的振幅透过率。通常,假设光波振幅的透射比在光瞳内服从均匀分布,设为常数τ。由于光强等于光波振幅模的平方,因此可以认为光学系统光能透过率为τ^2。

将光瞳函数代入光学调制函数,可得光学传递函数与光学系统透过率之间的关系,如(8)式所示:

$$\begin{aligned}OTF(s,t)=&\iint\left|\iint\tau(\xi,\eta)\exp[-\mathrm{i}kW(\xi,\eta)]\cdot\right.\\&\left.e^{-2\pi\mathrm{i}(\xi x+\eta y)}\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta\right|^2\cdot e^{-2\pi\mathrm{i}(xs+yt)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\\&\iint\tau^2\cdot\left|\iint OPF'(\xi,\eta)\cdot\right.\\&\left.e^{-2\pi\mathrm{i}(\xi x+\eta y)}\,\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta\right|^2\cdot e^{-2\pi\mathrm{i}(xs+yt)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\\&\iint\tau^2\cdot PSF'(x,y)\cdot e^{-2\pi\mathrm{i}(xs+yt)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\\&\tau^2\iint PSF'(x,y)\cdot e^{-2\pi\mathrm{i}(xs+yt)}\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\\&\tau^2OTF'(s,t)\end{aligned} \tag{8}$$

式中:$OPF'(\xi,\eta)$、$PSF'(x,y)$和$OTF'(s,t)$依次为τ等于1时的光瞳函数、点扩散函数和光学调制函数。设$OTF'(s,t)$在零频率处的值为a,则$OTF(s,t)$在零频率处的值为$a\tau^2$,对$OTF(s,t)$进行零频率值归一化,得:

$$OTF_{\text{归一化}}=\frac{OTF(s,t)}{a\tau^2}=\frac{\tau^2OTF'(s,t)}{a\tau^2}=\frac{OTF'(s,t)}{a} \tag{9}$$

从(9)式可以看出,当对$OTF(s,t)$进行零频率值归一化时,归一化后的光学传递函数值与光学透过率无关,总等于τ=1时的归一化光学传递函数值。因此,光学透过率不影响归一化后传递函数值,它只影响光学系统的总光能量。当然,如果由于透过率过低导致杂散光的引入从而影响到光能量在像面的分布,也会影响传递函数值。

从调制传递函数面积MTFA的角度来说,如图9(a)所示,MTFA是系统MTF和接收器噪声等效调制度NEM界定的面积。NEM是以调制传递函数的形式描述了系统噪声,定义为信噪比为1时所需调制度,NEM是空间频率的函数,也称为阈值可探测曲线(若是用人眼观察,则NEM对应人眼对比度阈值函数CTF,如图9(b)所示),NEM与MTF的交点对应的空间频率为系统极限分辨力。如果光学系统透过率降低,系统噪声相对增加,虽然MTF曲线不变,但是NEM相应增大,从而导致曲线所围面积MTFA减小,造成图像清晰度下降。

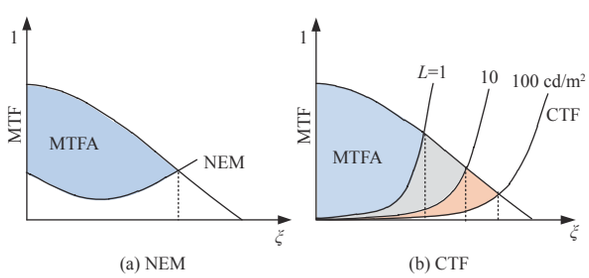


图9 MTF、NEM(CTF)和MTFA的关系

Fig. 9 The relationship between MTF, NEM (CTF) and MTFA

如图9(b)所示,由于人眼CTF随显示器亮度L提高向高频移动,MTFA随之增加,所以,随着光学透过率的降低,到达像面能量下降,若固定显示器亮度,则人眼CTF向低频移动,MTFA随之减少,图像清晰度下降。结合文中所述的3套工程样机的研制经验,对于多谱段长焦反射式光学系统来说,每个成像谱段光学透过率应不小于0.6。

3.1.2 波像差和MTF的关系

波像差与MTF的关系表达,国内外通常采用3种方法,包括高斯近似、像差参数和理论近似。前两种方法的准确性劣于理论近似,本文不做重点描述,可参考文献[19]。理论近似将有像差光学传递函数$\mathrm{OTF}_{\mathrm{optics}}$表示为衍射限光学传递

函数 $\mathrm{OTF_{diff}}$ 与像差光学传递函数 $\mathrm{OTF_{aberration}}$ 的乘积, 即 $\mathrm{OTF_{optics}}=\mathrm{OTF_{diff}}\cdot\mathrm{OTF_{aberration}}$。对一个圆孔径衍射限光学成像系统, 光学传递函数 $\mathrm{OTF_{diff}}$ 如(10)式所示[19]。

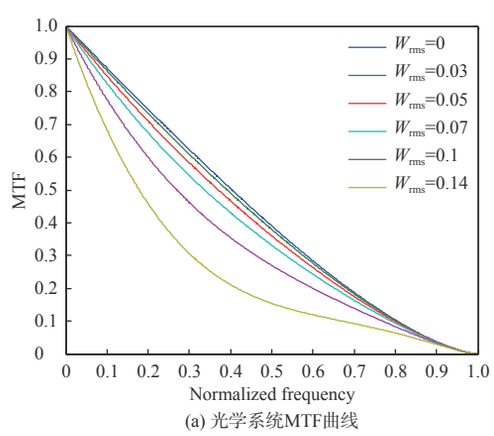
$$\mathrm{OTF_{diff}}(f_x)=\frac{2}{\pi}\left[\cos^{-1}\left(\frac{f_x}{f_{oco}}\right)-\left(\frac{f_x}{f_{oco}}\right)\sqrt{1-\left(\frac{f_x}{f_{oco}}\right)^2}\right] \tag{10}$$

$\mathrm{OTF_{aberration}}$ 采用 Shannon 给出的经验公式(见(11)式)表达[19]:

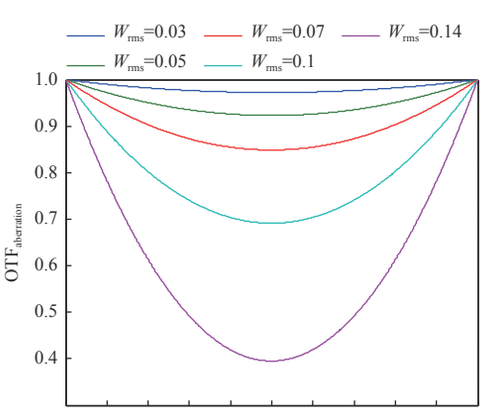
$$\mathrm{OTF_{aberration}}(f_x)\approx 1-\left(\frac{W_{rms}}{A}\right)^2\left[1-4\left(\frac{f_x}{f_{oco}}-\frac{1}{2}\right)^2\right] \tag{11}$$

式中: W_{rms} 表示波像差均方根值(λ); A=0.18; f_x 表示空间频率(cycles/mrad); $f_{oco}=D/\lambda$ 表示光学截止频率(cycles/mrad)。理论近似适用于轴上波像差峰峰值 W_{pp} 小于λ/2的小像差系统(注: 根据 Marechal 的建议[19], $W_{rms}=W_{pp}/3.5$, 故小像差系统对应的 W_{rms} 应小于λ/7)。

图 10(a)给出像差光学系统 MTF(即 $\mathrm{OTF_{optics}}$)与波像差的关系曲线; 图 10(b)给出了像差光学传递函数 $\mathrm{OTF_{aberration}}$ 曲线(反映了波像差引起理想光学传递函数的下降情况)。



(a) 光学系统MTF曲线



(b) 像差光学传递函数$\mathrm{OTF_{aberration}}$曲线

图 10　函数关系曲线图

Fig. 10　Curves of function relationship

由图 10(b)可以看出, 奈奎斯特频率处(归一化频率为 0.5), 波像差引起的传递函数下降最大, 当波像差均方根值为 0.07 λ 时, 奈奎斯特频率处的传函下降至衍射限传函的 0.85。对于多谱段长焦反射式光学系统来说, 结合文中所述的 3 套工程样机的研制经验, 一般认为, 接近衍射极限光学系统波像差均方根值应不大于 0.07 λ, 在第 1 个衍射环内集中点像能量不小于 80%, 中心点亮度比应不小于 0.8。

3.1.3　离焦和 MTF 的关系

光学系统离焦时, 离焦像斑近似为光分布均匀的圆斑, 系统点扩散函数可近似用圆函数表示, 如(12)式所示:

$$f(\rho,\theta)=\begin{cases}1, \rho\leqslant b\\ 0, \rho>b\end{cases} \tag{12}$$

式中: b 为离焦像斑的半径。离焦像斑的半径 b 可以用离焦量 Δ 表示, 有离焦量 $\Delta\approx 8\lambda F^2 W_{pp}$, 其中 W_{pp} 为波像差峰峰值, F 为光学系统 F 数, $F=f/D$, 最终得到离焦像斑的半径 b 如(13)式所示:

$$b=\frac{D}{2f}\Delta=\frac{4\lambda W_{pp}f}{D}=4\lambda W_{pp}F \tag{13}$$

将点扩散函数(半径为 b 的圆函数)进行傅里叶变换, 归一化后, 得到系统离焦光学系统调制传递函数 $\mathrm{OTF_{optics}}$, 如(14)式所示:

$$\mathrm{OTF_{optics}}(f_x)=\frac{2J_1\left(8\pi W_{pp}\dfrac{f_x}{f_{oco}}\right)}{8\pi W_{pp}\dfrac{f_x}{f_{oco}}} \tag{14}$$

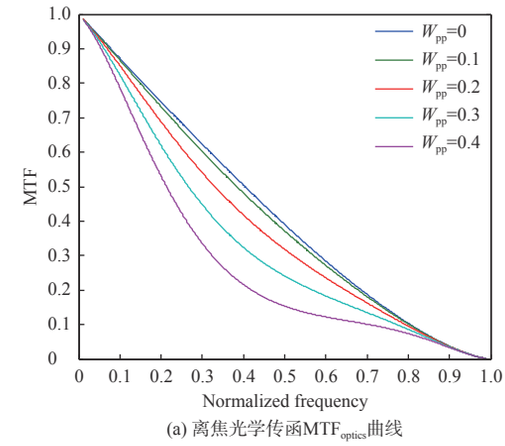
式中: $J_1(\cdot)$表示一阶 Bessel 函数; $\dfrac{f_x}{f_{oco}}$表示归一化频率。

离焦光学传递函数 $\mathrm{OTF_{optics}}$ 也可近似表示为衍射限光学传递函数 $\mathrm{OTF_{diff}}$ 与离焦光学传递函数 $\mathrm{OTF_{defocus}}$ 的乘积。对 W_{pp} 小于 2.2 λ 的情况, Shannon 给出 $\mathrm{OTF_{defocus}}$ 近似公式[20], 如(15)式所示:

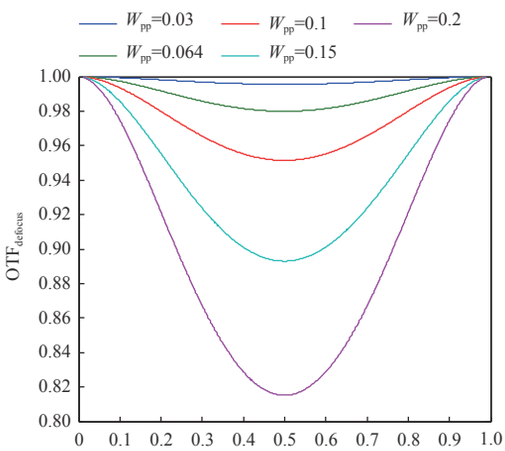
$$\mathrm{OTF_{defocus}}(f_x)\approx\frac{2J_1\left(8\pi W_{pp}\dfrac{f_x}{f_{oco}}\left[1-\dfrac{f_x}{f_{oco}}\right]\right)}{8\pi W_{pp}\dfrac{f_x}{f_{oco}}\left[1-\dfrac{f_x}{f_{oco}}\right]} \tag{15}$$

所以, 离焦光学系统调制传递函数 $\mathrm{OTF_{optics}}$ 可近似为(10)式和(15)式的乘积。

图 11(a)给出了离焦光学系统 $\mathrm{MTF_{optics}}$(即 $\mathrm{OTF_{optics}}$)与 W_{pp} 的关系曲线, 图 11(b)给出了离焦



(a) 离焦光学传函MTF_{optics}曲线



(b) 离焦传递函数$OTF_{defocus}$曲线

图 11　函数关系曲线图

Fig. 11　Curves of function relationship

传递函数 $OTF_{defocus}$ 曲线(反映离焦引起理想光学传递函数的下降情况)。从图 11(b)可以看出，当离焦引起的波像差峰峰值为 0.064 λ 时，奈奎斯特频率处(归一化频率为 0.5)传函下降至衍射限传函的 0.98。结合实际工程经验，一般认为，离焦引起的波像差峰峰值不大于 0.07 λ。

3.1.4　杂光和 MTF 的关系

光学系统的杂光是由非成像的光到达探测器面而形成的，包括透镜表面和边沿的多次反射光、镜筒壁的反射和散射光、探测器和光阑片的反射光等。杂光不仅造成光能的损失，而且降低图像清晰度。因此，杂光测量也是像质检测的重要方面之一。杂光的衡量用杂光系数来表征，杂光系数定义为到达像面上的杂光光通量与总光通量之比。杂光系数η与 MTF 的关系如(16)式所示[15]。杂光测试与测试条件关系很大，并且没有准确的标准传递，只能进行相对比较。通常情况下，同一部杂光测试仪对同一光学系统多次测量时，测量重复精度要达到 0.2%~0.5%。

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{optics}}=(1-\eta)\mathrm{MTF}\left(\frac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}\right)+\eta\frac{\sin 2\pi a\dfrac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}}{2\pi a\dfrac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}} \tag{16}$$

式中：MTF_{optics} 为受杂光影响的光学传递函数；MTF 为无杂光影响的理想传递函数；a 为像面半宽度。随着空间频率 f_x 的增大，$\sin 2\pi a\dfrac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}/2\pi a\dfrac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}$迅速减小，而且$0<\eta<1$，所以(16)式可简化为(17)式。取工程样机实际采用的探测器像面半宽度 a=5.5 mm，得到杂光系数与 MTF 的关系曲线，如图 12 所示。

$$\mathrm{MTF}_{\mathrm{optics}}=(1-\eta)\mathrm{MTF}\left(\frac{f_x}{f_{\mathrm{oco}}}\right) \tag{17}$$

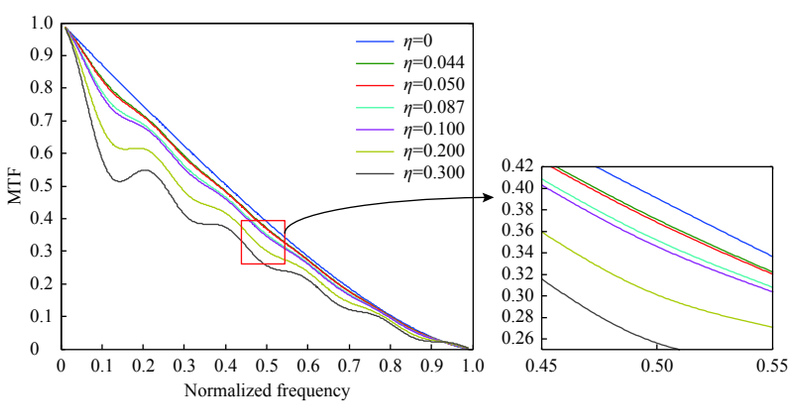


图 12　杂光系数与 MTF 的关系曲线

Fig. 12　Curves of relationship between stray light coefficient and MTF

由图 12 可以看出，杂光系数为 0.044、0.087 时，奈奎斯特频率处传函分别下降至衍射限传函的 0.95 和 0.9，对于多谱段长焦反射式光学系统来说，结合工程经验，杂光系数应控制在 0.05 以内。

3.2　光学测试比较

根据 2.1 节对 3 套光学成像系统的分析，第 3 套成像系统优于第 2 套，第 2、3 套成像系统均优于第 1 套成像系统(事实上，我们通过多次外场试验也证实了该结论)，因此接下来的光学测试比较，主要针对第 2、3 套光学系统展开。分别测试了光学传递函数(测试结果如图 13 所示)、星点像(如图 14 所示)、分辨力(如图 15 所示)、透过率、波像差、杂光系数等。

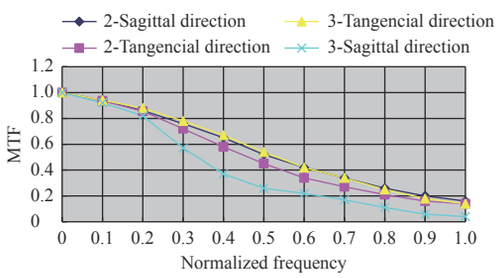


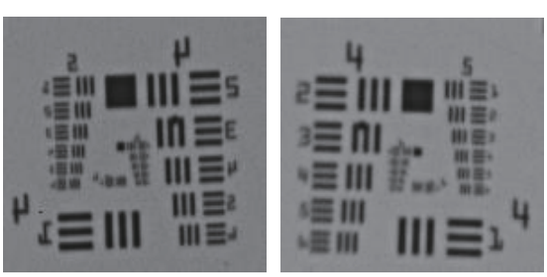
图 13　第 2、3 套光学成像系统 MTF 测试结果(包括子午、弧矢两个方向)

Fig. 13　MTF test results of the second and third optical imaging systems (including meridian and sagittal directions)

(a) 第2套　(b) 第3套

图 14　光学成像系统星点像测试结果

Fig. 14　Star point image test results of optical imaging system



(a) 第2套　(b) 第3套

图 15　光学成像系统分辨力测试结果

Fig. 15　Resolution test results of optical imaging system

由光学 MTF 测试结果可以得出，第 2 套成像系统子午和弧矢方向性能接近，第 3 套成像系统子午向性能优于弧矢向(两个方向的成像差异在分辨力测试中可以观察到)；星点像检验结果表示，第 2、3 套成像系统 80% 能量集中在直径 16.9 μm 圆内，第 2 套成像系统弥散斑是一个主斑、两个小角，主要像差是彗差，第 3 套成像系统弥散斑是一个十字，主要像差是像散；第 2 套成像系统比第 3 套成像系统波像差改善约 10%；第 3 套成像系统杂光系数比第 2 套成像系统下降 9%～12%；第 3 套成像系统光学透过率比第 2 套成像系统提高 18%。另外，图 8 所示系统传函与图 13 所示光学传函有差异，主要原因有二：一是图 8 所示传函为光学传函与探测器传函的乘积，图 13 所示仅为光学传函，不包含探测器传函；二是图 8 是根据外场测试结果分析得到，图 13 为实验室测试结果，未考虑大气湍流等因素对传函的影响。

4　结论

本文从图像清晰度的角度对光电成像系统图像质量进行评价，提出了基于相似特征区域提取的图像清晰度评价方法，降低背景、光照差异和噪声影响，使得图像清晰度客观评价指标能够正确反映人眼的主观感受。又从光学评价参数角度出发，研究了光学系统传递函数(MTF)的特点及与透过率、波像差、离焦、杂光的关系，并针对航空光电侦察系统采用的多波段长焦反射式光学系统，结合实际工程经验，建议其光学透过率不小于 0.6，光学系统波像差均方根值不大于 0.07 λ，离焦引起的波像差峰峰值不大于 0.07 λ，杂光系数不大于 0.05。

综上，要想设计一个成像清晰的光学成像系统，设计者需要把握和权衡包括光学结构形式、光学透过率、焦面位置、光学元件材料和面型精度、杂光系数、光学波像差等在内的多种光学因素的影响；同时，也要利用图像处理技术，进一步提升系统的成像观察质量。本文主要针对多波段长焦反射式光学成像系统进行分析，近年来多波段长焦反射式光学成像系统已成为非传统航空光学情报侦察监视产品领域的一类发展趋势，对于它的深入工程化研究，我们将继续进行下去。

参考文献：

[1] 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.

[2] 程志峰, 刘福贺, 荀显超. 双波段共口径成像系统光机设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3366-3372.
CHENG Zhifeng, LIU Fuhe, XUN Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(11): 3366-3372.

[3] 朱海滨, 邵毓, 张远健, 等. 可见光/红外双视场全景式航空侦查相机光学系统设计[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.

[4] 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.

[5] IYENGAR M. The Goodrich 3rd generation DB-110 system: operational on tactical and unmanned aircraft[J]. Health Care Management Review, 2006, 620909: 1-14.

[6] WYATT S H. Dual spectral band reconnaissance systems for multiple platforms[J]. SPIE, 2002, 4824: 36-46.

[7] 时红伟, 陈世平. 一种面向用户任务需求的遥感图像质量标准-NIIRS[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(3): 34-39.
SHI Hongwei, CHEN Shiping. A remote sensing image quality standard orienting to user's mission requirements - NIIRS[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2003, 24(3): 34-39.

[8] MICHAEL L J, JAMES H, DANIEL V, el al. 光电系统设计、分析和测试[M]. 杨应槐, 译. 北京: 航天工业总公司第三研究院8358所, 2001: 124-144.
MICHAEL L J, JAMES H, DANIEL V, el al. Electro-optical system design, analysis and testing[M]. Translated by YANG Yinghuai. Beijing: 8358 Institute of the Third Research Institute of Aerospace Industry Corporation, 2001: 124-144.

[9] HOLST G C, KRAPELS K A, OLSON C, et al. Model development and system performance optimization for staring infrared search and track (IRST) sensors[J]. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9820: 98200B.

[10] 王惠林, 宁飞, 冯涛. 基于TTP准则的光电侦察设备作用距离评估[J]. 应用光学, 2019, 40(增刊): 1-7.
WANG Huilin, NING Fei, FENG Tao. Evaluation of operational distance of photoelectric detection equipment based on TTP criterion[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(Sup): 1-7.

[11] WILLIAMS C S, BECKLUND O A. Introduction to the optical transfer function[M]. US: SPIE Press, 2002.

[12] HOLST G C. 光电成像系统性能[M]. 阎吉祥, 俞信, 解天宝, 等, 译. 4版. 北京: 国防工业出版社, 2015: 136-141.
HOLST G C. Electro-optical imaging system performance[M]. Translated by YAN Jixiang, YU Xin, XIE Tianbao, et al. 4th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 136-141.

[13] 陈亮, 李卫军, 谌琛, 等. 数字图像清晰度评价函数的通用评价能力研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(14): 152-155.
CHEN Liang, LI Weijun, CHEN Chen, et al. Efficiency contrast of digital image definition functions for general evaluation[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(14): 152-155.

[14] GUELER R, OLSON C, SPARKS A. In-flight optical performance measurement of high-resolution airborne imagery[C]//Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVIII. US: International Society for Optics and Photonics, 2017: 1017806.

[15] 苏大图. 光学测量与象质鉴定[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988: 374-375.
SU Datu. Optical measurement and image quality identification[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 374-375.

[16] 韩昌元. 光学系统成像质量评价及测试[M]. 长春: 中国科学院长春精密机械与物理研究所, 2013: 26-43.
HAN Changyuan. Optical system image quality evaluation and test[M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2013: 26-43.

[17] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 1-9.
HAN Changyuan. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 1-9.

[18] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.

LI Xiaotong, CEN Zhaofeng. Geometrical optics, aberrations and Optical Design[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.

[19] HOLST G C. Electro-optical imaging system performance[M]. 5th ed. Washington DC: JCD Publishing, 2008: 84-86.

[20] SHANNON R R. A useful optical engineering approximation[J]. Optics & Photonics News, 1994, 5(4): 34.