光电测量设备图像高频频谱对主观评价的影响

张 宁 沈湘衡 叶 露 宋 莹
中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 分析了光电测量设备图像质量评价研究过程中,图像频谱高频分量对图像质量人眼主观评价影响的途径和解决措施。对清晰图像通过Butterworth低通滤波器在频域进行了低通滤波,然后利用滤波图像分析了图像高频频谱对人眼主观感受的影响。用斜狭缝法对离焦成像系统的调制传递函数(MTF)进行了测试,并对相应离焦状态的模糊图像进行了主观评价。对不同像元尺寸相机获取的图像进行了频谱分析和图像评价,实验结果表明,图像频谱高频分量比例增多,图像具有更丰富的细节和更高的清晰度,准确调焦及采用小像元尺寸相机是提高光电测量设备图像质量的重要因素。给出了影响光电测量设备图像质量的其他因素,并提出了改进措施。

关键词 成像系统; 光电测量设备; 高频频谱; 调制传递函数; 低通滤波器; 主观评价
中图分类号 TP752.2 **文献标识码** A
doi: 10.3788/AOS201636.0411002

Influence of High Frequency Spectrum of Photoelectric Measurement Equipment Images to the Subjective Evaluation

Zhang Ning Shen Xiangheng Ye Lu Song Ying
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, *China*

Abstract In the course of studying the image quality assessment of photoelectric measurement equipment, the influence approach of the high frequency component of image spectrum to image quality subjective evaluation of the human eye and solving measures are analyzed. The clear image is processed by Butterworth low-pass filter in frequency domain. Then the influence of the high frequency part of image spectrum to the human eye subjective feeling is analyzed by filtering the image. The modulation transfer function (MTF) of defocus imaging system is measured by using the canted slit method, and the corresponding defocus blurred images are evaluated subjectively. Spectrum analysis and image evaluation of images acquired by the cameras with different pixel sizes are carried out. Experimental results indicate that the images have more high frequency component, richer details and higher clarity. Focusing exactly and capturing by camera with small pixel size are important measures to improve the image quality of the photoelectric measurement equipment. Other influencing factors and improving methods are proposed and the improving measures are put forward.

Key words image processing; photoelectric measurement equipment; high frequency spectrum; modulation transfer function; low-pass filter; subjective evaluation
OCIS codes 110.3000, 110.2960; 110.4850

1 引 言

目前,对光电测量设备图像质量评价仍限于设备研制、使用人员的人眼主观评价,缺少统一的评价标准和客观评价方法[1]。将光电测量设备[2]各环节如光学系统、成像传感器、图像处理器以及图像传输、存储等影

收稿日期: 2015-09-07; **收到修改稿日期**: 2015-11-16
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(611307114)
作者简介: 张 宁(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光电设备精密检测及图像质量评价技术方面的研究。
E-mail: ning0025@163.com

响图像质量的因素归结为具有通用性、规范性，具有明确物理意义的指标，在量化和检测方面同样存在巨大困难。因此，亟需开展图像质量评价方法以及影响图像质量的因素方面的研究工作，为提高图像质量提供思路和改进措施。

本文在光电测量设备图像质量评价课题中开展了图像频谱分量、图像质量以及与人眼主观评价[3-4]相关的研究。通过二维傅里叶变换得到图像频谱，分析图像频谱中各频谱分量分布。在频域对清晰图像进行了不同截止频率的Butterworth低通滤波处理，再将滤波图像变换为空域图像，通过分析人眼对低频滤波图像失真的主观评价，研究图像各频谱分量与图像质量的关系。光电测量设备的成像系统作为一个低通滤波器，其离焦相当于滤波器截止频率下降，从而影响高频信息通过。光学传递函数即反映其成像的空间频谱特性，因此，通过测试系统调制传递函数(MTF)分析了系统离焦时MTF值与图像频谱关系。另外，进行了不同像元尺寸的相机成像对比实验，分析了相机空间截止频率与图像频谱高频分量的关系。在此基础上研究对光电测量设备图像质量主观评价过程中感觉模糊、不清晰的主要影响因素，为今后光电测量设备图像质量改进提供理论基础和改进措施。

2 图像频谱计算

人眼看到的图像是在空间域上的，由于空间域的强相关性，可以通过图像变换技术将图像空域信号变为其他正交矢量空间。其中，傅里叶变换[5]是最重要的变换手段。傅里叶变换能够将图像的灰度分布函数变换为图像的频率分布函数，而傅里叶逆变换再将图像频率分布函数变换为灰度分布函数[6]。利用二维离散傅里叶变换将图像变换至频率域，分析图像高频频谱分量与人眼视觉的关系。

离散图像 $f(x,y)$ (其中，$x=0,1,\cdots,M-1$；$y=0,1,\cdots,N-1$)的二维离散傅里叶变换为

$$\mathscr{F}(u,v)=\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1}f(x,y)\exp\left[-\mathrm{j}2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)\right], \tag{1}$$

式中 u 和 v 是频率变量，$u=0,1,\cdots,M-1$；$v=0,1,\cdots,N-1$。而 $\mathscr{F}(u,v)$ 的二维离散傅里叶反变换为

$$f(x,y)=\frac{1}{MN}\sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1}\mathscr{F}(u,v)\exp\left[\mathrm{j}2\pi\left(\frac{ux}{M}+\frac{vy}{N}\right)\right]. \tag{2}$$

图像 $f(x,y)$ 的傅里叶变换幅度谱定义为

$$\left|\mathscr{F}(u,v)\right|=\sqrt{R^2(u,v)+I^2(u,v)}\quad, \tag{3}$$

式中 $R(u,v)$ 和 $I(u,v)$ 表示图像傅里叶变换 $\mathscr{F}(u,v)$ 的实部和虚部。

对图1的两幅图像进行傅里叶变换并计算其幅度谱，如图2所示。图2中，频谱坐标原点位于窗口左上角，图像频谱低频部分位于窗口的四角，高频部分往里延伸。此时不利于观察图像的频谱，对频谱进行移位使其坐标原点位于窗口中央。移位后的图像频谱图如图3所示，窗口中央特别亮的部分即为低频部分，向外频率逐渐增高，而且可以明显地看出清晰图像的高频部分明显比模糊图像的高频部分多，在频谱图上表现为窗口明亮区域面积大。

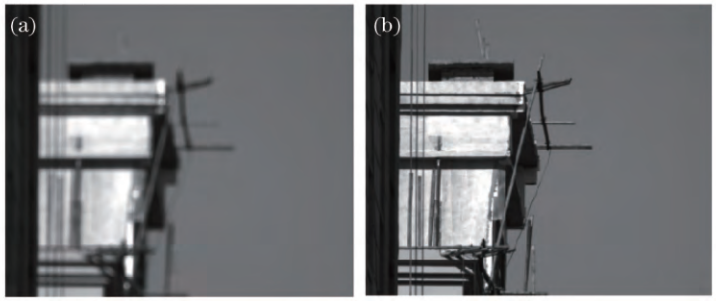


图1 灰度图像。(a) 模糊图像；(b) 清晰图像

Fig.1 Gray images. (a) Blurred image; (b) clear image

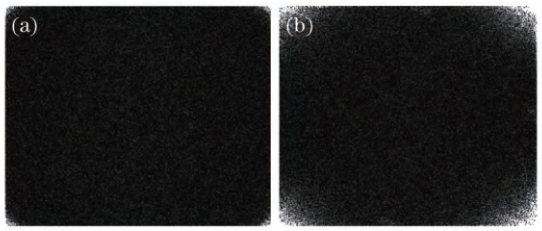


图2 灰度图像的频谱。(a) 模糊图像频谱;(b) 清晰图像频谱

Fig.2 Spectrum of gray images. (a) Spectrum of blurred image; (b) spectrum of clear image

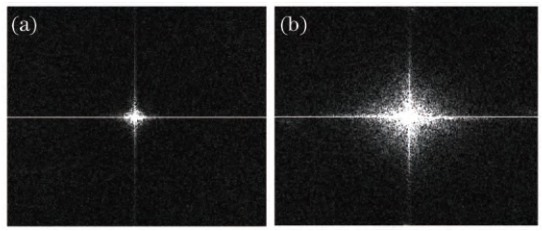


图3 移位后的灰度图像频谱。(a) 模糊图像频谱;(b) 清晰图像频谱

Fig.3 Spectrum of gray images after displacement. (a) Spectrum of blurred image; (b) spectrum of clear image

3 图像频谱分量对主观评价的影响分析

从空间频率来看,人眼具有低通滤波特性,但是难以用一个非常准确的模型表述,采用Butterworth低通滤波模型分析图像频谱分量对主观评价的影响。

图像各频率段对人眼提供不同的信息和视觉效果,可以对清晰图像在频域进行低通滤波处理,测试高频频谱如何影响人眼对图像质量的主观评价。低通滤波器的功能就是让低频信息通过而滤掉或衰减高频信息,所以低通滤波的效果就是抑制了图像的边缘,造成图像在不同程度上的模糊[4]。

对于大小为 $M\times N$ 的图像,频率点 (u,v) 与频率中心的距离为 $D(u,v)$,则

$$D(u,v)=\sqrt{\left(u-\frac{M}{2}\right)^2+\left(v-\frac{N}{2}\right)^2}\quad . \tag{6}$$

选择Butterworth低通滤波器对清晰图像进行滤波处理,其滤波器为

$$H(u,v)=\frac{1}{1+\left[D(u,v)/D_0\right]^{2n}}\ , \tag{7}$$

式中 D_0 为Butterworth低通滤波器的截止频率,也即到原点的距离,n 为Butterworth低通滤波器的阶数。

利用Butterworth低通滤波器对图4(a)原始图像进行低通滤波。滤波器阶数设为6阶,滤波器频率也即到频谱中心点数分别为180、80、60、40、20,得到滤波图像和对应频谱如图4(b)~ (f)所示。

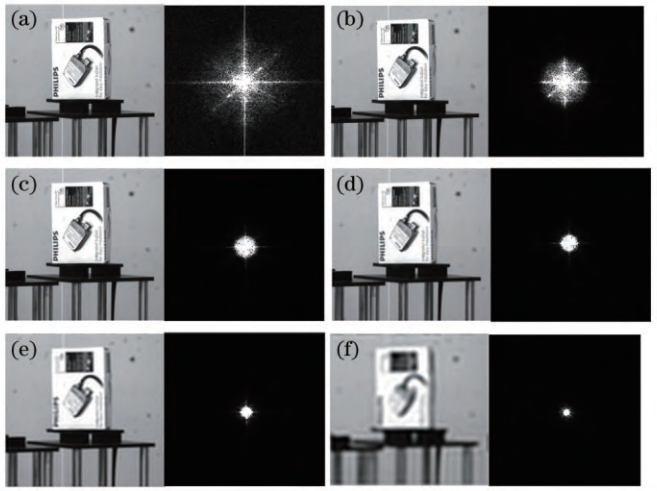


图4 低通滤波图像及移位频谱

Fig.4 Images through low-pass filter and spectrum after displacement

由图4可知,随着滤波器截止频率的下降,图像边缘等细节信息迅速丢失,图像清晰度也明显下降。当滤波截止频率设置为20时,图像细节已经不能分辨,仅剩下图像背景轮廓,滤波图像的幅度谱也仅剩下位于中央的低频分量。从图像移位频谱图可以清晰看出,图像的边缘、纹理等细节主要位于中高频部分。低通滤波器可以滤掉位于高频部分的大量噪声。当截止频率为180时,滤波图像与原图从人眼视觉的角度主观评价,没有图像质量的下降。而通过幅度谱可以清晰看到,通过低通滤波后大量的高频噪声信息被滤掉,表

现为幅度谱图的四周变得干净。

4 光电测量设备图像频谱影响因素测试

光电测量设备的光学系统可以看作一个低通空间滤波器，光学传递函数即反映其成像的空间频谱特性。光电成像系统的MTF[7]从空间分辨率方面表征了光电成像系统真实复现外界场景的能力。同一光电成像系统，相同的MTF值[8]对应更高的空间分辨率则表明图像具有更高的频谱分量通过能力，也就具有更高的图像质量。

4.1 调焦与图像清晰度及MTF关系测试

目前光电测量设备调焦主要依靠人眼观察进行手动、半自动调焦，或根据距离信息来实现距离自动调焦，距离信息通过激光测距或数据引导而得到。温度变化会使光电测量设备焦面发生变化，为减小环境温度变化对光电测量设备成像系统的影响，目前主要是利用温度经验公式补偿温度引起的离焦量[9]。光电测量设备跟踪测量过程中会因为调焦不到位直接影响图像的对比度、清晰度[10-11]，同时也间接影响了设备跟踪距离。

为验证光电测量设备离焦量、整机MTF值及光电测量设备图像质量主观评价三者之间的关系，进行了实验。由于目前缺少大型光电测量设备整机MTF测试能力，所以搭建了小口径成像系统在实验室内进行实验。

利用美国Optics公司的4000 mm离轴式平行光管及目标靶进行了MTF测试，采用斜狭缝法对成像系统进行了MTF测试，实验照片如图5所示。

成像系统MTF截止频率一般为相机的奈奎斯特频率，也即1/2d，其中d为相机像元尺寸。其中，d=3.45 μm，则成像MTF截止频率为144.9 lp/mm。选择合适宽度的狭缝靶板，获取聚焦状态的狭缝图像如图6所示。得到成像系统的线扩散函数(LSF)和MTF曲线，如图7所示。在奈奎斯特频率处的MTF值为0.278。

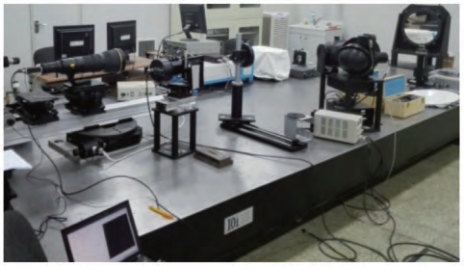


图5 MTF测试照片

Fig.5 Photo of testing the MTF



图6 斜狭缝像图

Fig.6 Image of canted slit

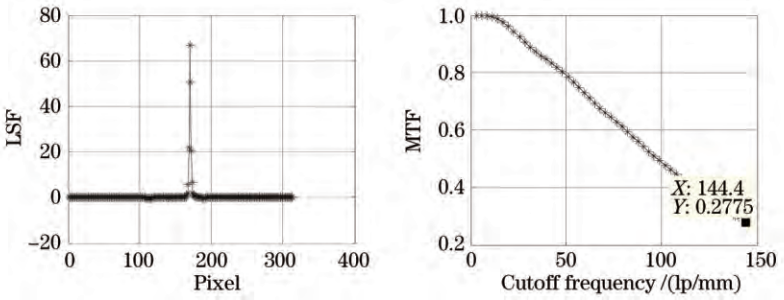


图7 LSF和MTF曲线图

Fig.7 Graphs of LSF and MTF

利用成像系统拍摄此时的清晰图像以及一系列离焦模糊图像，图像序列如图8所示。然后利用斜狭缝法测试了对应离焦位置的成像系统整机MTF，得到MTF曲线如图9所示。

图8(a)~(c)中的图像模糊，仅能够看清图像中目标的轮廓，图像边缘、细节均不能分辨，而对应的MTF曲线随着频率增加下降非常快，到了中、高频时基本接近零。图8(d)、(e)图像逐渐清晰，图像目标对比明显，细节基本可以分辨，而图8(f)中图像最清晰，细节可以明显分辨。图9中MTF曲线同样与之对应，MTF整体近似

成线性下降，中、高频部分下降缓慢，说明图像含有大量的中、高频信息，而对人眼视觉感观也处于最佳状态[12]，因为人眼对图像中的边缘、纹理等结构分布最敏感[13]。

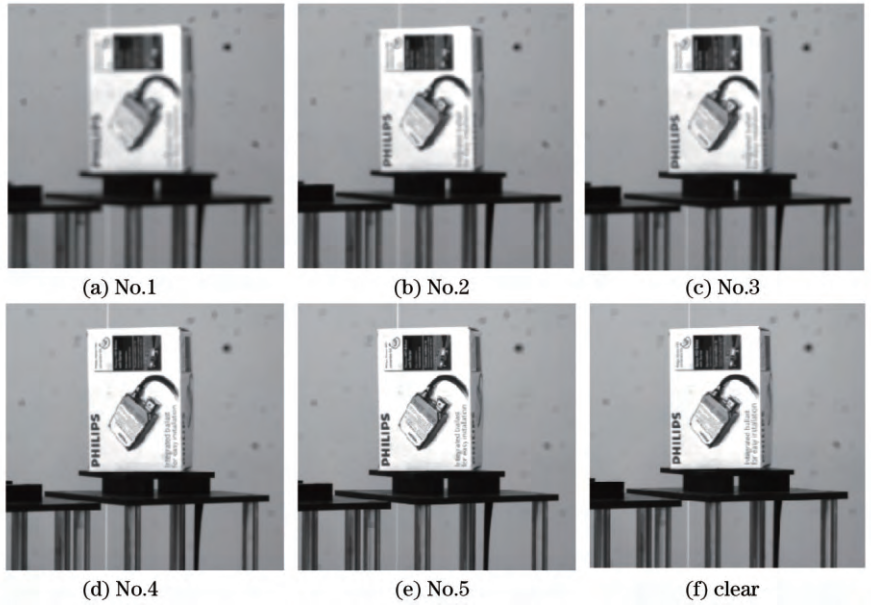


图8 离焦模糊及清晰图像序列

Fig.8 Serials of defocus blurred image and clear image

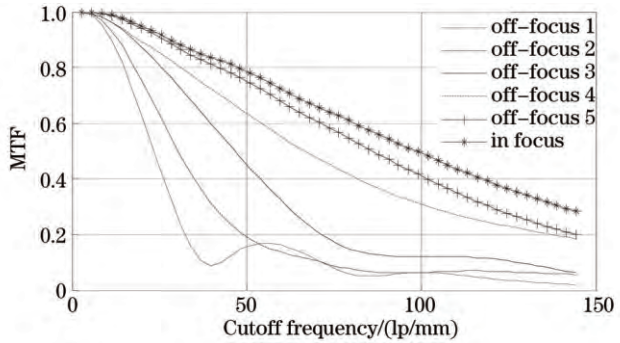


图9 对应各离焦图像的成像系统MTF曲线

Fig.9 MTF curves of imaging system with relevant defocused images

从实验结果可知，光学系统可以看作一个低通滤波器，其频率特性可由MTF表示，离焦量增加相当于滤波器截止频率下降，进而导致图像频谱的中高频频谱分量不足引起图像质量下降。由此可见，保证光电测量设备调焦准确性是发挥设备最佳成像能力重要措施。

4.2 相机尺寸对图像高频频谱的影响

利用某型号光电经纬仪可见光相机在试验场进行了大量成像实验。光电经纬仪可见光相机主要参数包括：1) 像元尺寸为12 μm；2) 像面数为1018×1008(实测)。

记录到的清晰飞机和月亮图像如图10所示。此时，光电经纬仪已经反复调整至最佳状态，包括调光调焦、伺服控制等。获取的图像目标总体清晰，目标轮廓可分辨。例如，可以识别出飞机型号，月亮环形山轮廓完整。对图像放局部放大处理得到局部图像如图11所示。分析局部放大图像，发现目标的边缘模糊、不锐利，远未达到主要部件轮廓可提取、部件几何尺寸特征可提取、图像目标可高分辨的要求。

光电经纬仪拍摄的清晰图像边缘不锐利，但此时光电经纬仪跟踪稳定，调光调焦也达到最佳状态，不存在像移和离焦问题。根据奈奎斯特定理，光电经纬仪整机MTF截止频率仅41 lp/mm。由此可见，光电经纬仪选用相机像元尺寸较大，使成像截止频率过低，导致获取的图像频谱中高频频谱分量严重不足，从而使图像边缘模糊。

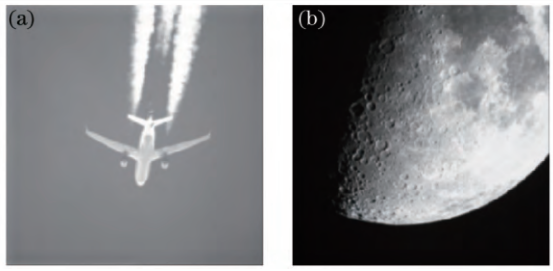


图 10 光电经纬仪记录的图像。(a) 飞机; (b) 月亮

Fig.10 Images of photoelectric theodolite. (a) Airplane; (b) moon

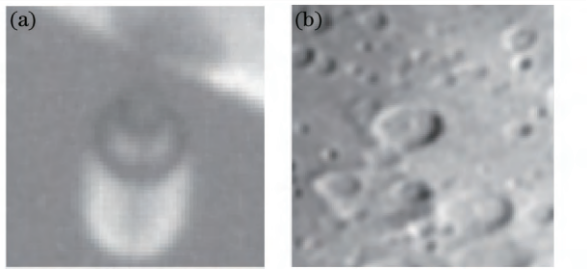


图 11 光电经纬仪记录的图像局部。(a) 飞机图像局部; (b) 月亮图像局部

Fig.11 Partial images of photoelectric theodolite. (a) Partial photo of airplane; (b) partial photo of moon

由于光电经纬仪相机型号不能随便更换,所以在实验室搭建了一套成像系统进行了测试。采用同一套光学系统,分别利用两台不同像元尺寸的相机进行了成像对比实验。两台相机像面位置一致,实验期间光学系统焦面位置保持不变。像元尺寸为 12 μm 的可见光相机与像元尺寸为 3.45 μm 的两台相机成像分别如图 12(a)、(b)所示,对应的图像频谱如图 13(a)、(b)所示。仔细对比图 12(a)、(b)两幅图像,会发现图 12(b)含有更丰富的细节,边缘更锐利。通过分析图 13(a)、(b)中图像频谱,则可以更明显地看出,小像元相机图像高频分量比例明显增多,从而也就具有更丰富的图像细节。

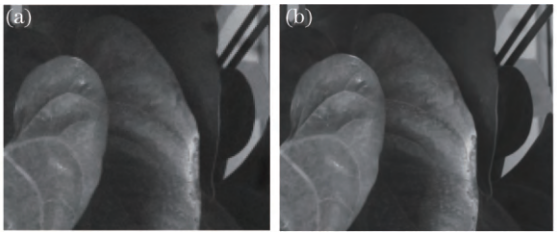


图 12 不同像元尺寸的图像。(a) 12 μm 像元相机图像; (b) 3.45 μm 像元相机图像

Fig.12 Image with different pixels. (a) Image of camera with 12 μm pixel; (b) image of camera with 3.45 μm pixel

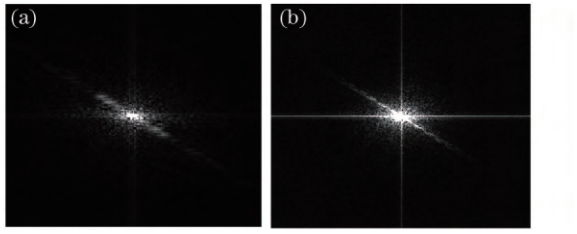


图 13 不同像元尺寸的图像频谱。(a) 12 μm 像元相机图像频谱; (b) 3.45 μm 像元相机图像频谱

Fig.13 Image spectrum with different pixels. (a) Image spectrum of camera with 12 μm pixel; (b) image spectrum of camera with 3.45 μm pixel

5 影响光电测量设备图像质量的因素分析

第 4 节为提高光电测量设备图像高频频谱和图像质量进行了两项实验验证,分别是光电设备调焦与图像清晰度以及系统 MTF 关系的实验,大小像元尺寸相机成像对比实验。

除此之外,光电测量设备跟踪不稳定引起图像的像移[14]也直接导致图像中高频分量下降,进而影响图像质量。另外,光电测量设备图像采集、传输、处理、存储过程,也会导致图像质量下降,从而影响主观评价效果,但这些不是主要因素。

根据上述分析,提高光电测量设备图像质量的主要措施包括以下几个方面:

1) 采用适当小像元尺寸、大像元数的相机,提高设备的高频信息获取能力;

2) 研究实时、准确调焦技术,如基于图像处理的高精度自动调焦技术等;

3) 提高跟踪平稳性和跟踪精度,减小像移误差;

4) 研究高效的图像噪声抑制、无损压缩技术,减少图像传输、处理过程中的失真。

6 结 论

在光电测量设备图像质量评价以及影响因素研究中,利用傅里叶变换将图像从空间域变换到频率域,在频率域研究了图像幅度谱的高频分量与图像质量主观评价的关系。利用 Butterworth 低通滤波器对清晰图像在频域进行了低通滤波处理,然后对滤波后的图像进行了人眼主观评价,表明图像频谱高频分量直接影响图像的清晰度、对比度,进而影响人眼的主观评价。开展了成像系统不同离焦状态的 MTF 测试和离焦图

像高频频谱关系，以及不同像元尺寸的相机获取图像高频频谱对比实验。实验结果表明，相同空间频率点的MTF值越高，则获取图像的频谱高频分量越大，图像边缘等细节越清晰、锐利。在此基础上，分析了引起光电测量设备图像质量下降的因素，提出了改进措施。

参 考 文 献

1 Fan Yuanyuan, Shen Xiangheng, Sang Yingjun. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2485-2493.
范媛媛, 沈湘衡, 桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2485-2493.

2 Gong Zhihua, Duan Pengwei, Xu Xu, *et al*.. Analysis on a method of convenient dynamic accuracy appraisal for optical theodolite[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112004.
宫志华, 段鹏伟, 徐 旭, 等. 一种光学经纬仪动态精度简易鉴定方法分析[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112004.

3 Wang Z, Bovik A C. Mean squared error: Love it or leave it? A new look at signal fidelity measures[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(1): 98-117.

4 ITU. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures ITU-R REC. BT.500-12[S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2009.

5 Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al*.. A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223001.
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223001.

6 Jiang Yanfeng, Yu Qifeng, Liang Yonghui. Identification of motion blur direction from motion blurred image by spectrum analysis[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 68-70.
蒋岩峰, 于起峰, 梁永辉. 基于频谱分析的匀速运动模糊图像模糊方向识别[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 68-70.

7 Xu Baoshu, Shi Zelin, Feng Bin. Modulation transfer function measurement method of electro-optical imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1111004.
徐保树, 史泽林, 冯 斌. 一种光电成像系统调制传递函数的测量方法[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1111004.

8 Li Tiecheng, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al*.. New analytical line spread function fitting model for modulation transfer function calculation [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3454-3459.
李铁成, 冯华君, 徐之海, 等. 一种可用于调制传递函数计算的新型线扩展函数拟合模型[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3454-3459.

9 Yang Fei, Ming Ming, Wang Fuguo, *et al*.. Influences of thermal diversification to opto-mechanical system of 1.23 m telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(1): 26-30.
杨 飞, 明 名, 王富国, 等. 温度变化对1.23 m望远镜光机系统的影响[J]. 光子学报, 2012, 41(1): 26-30.

10 Chen Guojin, Zhu Miaofen, Zhang Kesong. Image definition evaluation function in auto-focusing process[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(2): 165-169.
陈国金, 朱妙芬, 张克松. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 165-169.

11 Zhang Yanchao, Zhao Jian, Han Xizhen, *et al*.. Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 240-244.
张艳超, 赵 建, 韩希珍, 等. SUSAN清晰度评价函数在自动对焦中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 240-244.

12 Nadenau M J, Winkler S, Alleysson D, *et al*.. Human vision models for perceptually optimized image processing-a review[J]. Proceedings of the IEEE, 2000: 32.

13 Golestaneh S A, Chandler D M. No-reference quality assessment of jpeg images via a quality relevance map[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(2): 155-158.

14 Meng Fanhao, Ding Yalin, Wang Dejiang, *et al*.. Analysis of influence of image motion on auto-focus precision for high resolution aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0611001.
孟繁浩, 丁亚林, 王德江, 等. 像移对长焦距高分辨率航空相机检调焦精度影响的分析[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0611001.

栏目编辑：苏 岑