

doi:10.3788/gzxb20154409.0911003

# 望远镜扩展成像像质方法研究

谭碧涛<sup>1,2,3</sup>, 陈洪斌<sup>1</sup>, 王继红<sup>3</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西北核技术研究所, 西安 710024)

**摘 要:** 现有评价方法单独针对噪声或模糊全景图像, 不能满足望远镜扩展成像评价需求, 为此, 结合望远镜成像机理特性, 设计并提出了一种对比度与结构相似度下的无参考成像像质评价方法, 给出了该方法的基本原理、具体实现流程以及数学模型, 并结合仿真图像与实测图像对所提方法进行有效性验证, 结果表明: 所提出的评价方法可以给出序列离焦图像、噪声图像以及离焦噪声图像的有效定量评价价值, 评价结果接近于人眼的视觉特性, 该方法实现了对同时受到噪声与模糊影响扩展望远镜成像像质的有效定量评价, 评价结果具有高的准确性、单调性以及一致性。

**关键词:** 望远镜; 成像质量; 结构相似度; 对比度; 评价

中图分类号: N391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0911003-6

## Image Quality Evaluation on Extended Imaging of Telescopes

TAN Bi-tao<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hong-bin<sup>1</sup>, WANG Ji-hong<sup>3</sup>

(1 Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Based on the defects of single noises analysis or blur analysis in image quality evaluation, combined with telescope extended imaging characteristics, an image quality evaluation method under contrast and Structural similarity was designed and proposed, the basic principle, the specific implementation process as well as mathematical models of this method was given. The simulation image and measured image were used to validate the proposed method, validation results show that: the proposed evaluation method can give an effective evaluation value on sequence defocused image, noise image, defocused and noising image, the evaluation results close to human visual characteristics. The method can evaluate the image affected by noise and blur simultaneously effectively, and can give effective quantitative evaluation value. The evaluation results have high accuracy, monotony and consistency.

**Key words:** Telescope; Image quality; Evaluation; Structural similarity; Contrast

**OCIS Codes:** 110.3000;110.2960;040.150;120.4820

## 0 引言

图像质量评价方法分为主观评价方法和客观评价方法<sup>[1-3]</sup>。理论来说, 图像质量的主观评价较准确, 它充分考虑了人眼对图像的视觉感知, 可以很好地反映图像的直观质量。但在工程应用上存在不少缺点, 如费时费力繁琐、数学模型描述难、定量准确测量难、无法实

时操作等; 此外, 主观评价结果易受观察者的知识背景、经验、测试环境等多种因素的影响, 带有明显的主观性, 且其稳定性、可移植性较差, 因此, 在实际工程应用中常常采用客观评价方法<sup>[4-7]</sup>。根据对原始图像信息的依赖程度, 客观评价分为全参考评价、弱参考评价和无参考评价三种评价方法<sup>[8-9]</sup>。望远镜扩展成像时, 常常无法获知目标的先验信息, 其成像质量评价属于无

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目(No. 2012AA8083027) 资助

**第一作者:** 谭碧涛(1983-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为光电探测跟踪. Email: tanbitao@aliyun.com

**导师(通讯作者):** 陈洪斌(1953-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光学和光束控制技术。Email: chbin@ioe.ac.cn

**收稿日期:** 2015-02-05; **录用日期:** 2015-05-15

<http://www.photon.ac.cn>

参考评价,即直接对失真图像进行质量评价。

作为典型无参考评价方法之一,图像清晰度评价可反映望远镜扩展成像质量,清晰图像具有丰富的细节特征与较锐化的边缘,在空域上表现为边缘像素的相邻特征值变化比较大,在频域上表现为高频分量多.导致望远镜图像清晰度下降的原因有很多,包括望远镜成像过程中受到大气湍流、振动、内部光路像差等导致的模糊;光的衍射以及压缩之后高频丢失等产生的各类模糊,电子系统高频性能不良致使图像高频分量损失而使图像模糊,各种噪声导致高频细节掩盖等。

当望远镜的口径增大到一定值时,望远镜将对空间目标成扩展像,不再为点目标像,且跟踪探测过程中扩展像位于视场的中心,即中心区域成像模式,因此,可以通过评价其成像质量来实现对其成像性能的研究.目前,针对数字图像常见的清晰度评价方法主要有梯度函数法、频谱函数法、熵函数法等<sup>[10-14]</sup>.但现有各方法基本均为针对全景图像,且常常单独针对噪声影响或模糊影响图像开展评价,无法满足同时对受噪声与模糊影响扩展成像像质评价需求.本文设计并提出了一种对比度与结构相似度下的无参考成像质量评价方法,给出了该方法的基本原理、具体实现流程以及数学模型,结合特定图像,利用提出的评价方法进行了仿真分析。

## 1 望远镜扩展成像机理分析

望远镜扩展成像机理如图1, $o(x,y)$ 为目标物体光强分布函数(又称为目标图像), $n(x,y)$ 为成像系统加性噪声, $g(x,y)$ 为系统所获取的观测图像。

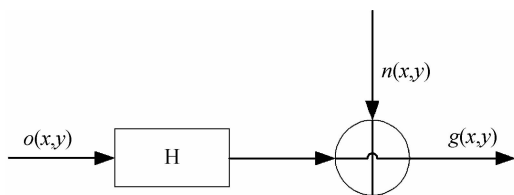


图1 望远镜扩展成像机理

Fig. 1 Telescope extended imaging mechanism

光学成像系统可以合理地近似为一个空间平移不变的线性系统,而系统的单位冲激响应即一个单位强度点光源 $\delta(x,y)$ ,通过成像系统所成的像为系统点扩展函数(Point Spread Function, PSF),系统的目标像可以表示为<sup>[15-17]</sup>

$$g(x,y) = o(x,y) * h(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中,\*表示二维卷积算子; $h(x,y)$ 为系统的点扩展函数。

在理想情形下,望远镜的点扩展函数 $h(x,y)$ 为狄拉克(Dirac)冲激函数 $\delta(x,y)$ ,而且不存在噪声,即 $n(x,y)=0$ ,此时,跟踪发射望远镜所成图像 $g(x,y)$ 即为目标物体本身 $o(x,y)$ .事实上,对于有限孔径的望

远镜而言,光波的衍射效应使其点扩展函数并不是冲激函数 $\delta(x,y)$ ,而是与光瞳函数有关,在系统设计中,理论上可通过设计系统的光瞳使其光瞳函数达到预期便可获取能满足系统需要的成像.但是,望远镜扩展成像过程中同时受到模糊与噪声的影响,使系统的点扩展函数变得随机而复杂,系统的成像质量下降,进而使得系统的成像像质评价比较复杂。

根据卷积定理,对式(1)做卷积运算,得到其在频域空间的表示为

$$G(u,v) = O(u,v)H(u,v) + N(u,v) \quad (2)$$

式中, $G(u,v)$ 、 $O(x,y)$ 、 $H(u,v)$ 、 $N(u,v)$ 分别为 $g(x,y)$ 、 $o(x,y)$ 、 $h(x,y)$ 、 $n(x,y)$ 的傅里叶变换结果。

通过式(2)可以看出,成像模型的卷积被转化为相应空间的简单乘积,显然由于乘积形式相对于卷积的简洁.噪声是相加的,模糊量是相乘量,其成像效果可见图2(为仿真中心区域成像图像)。

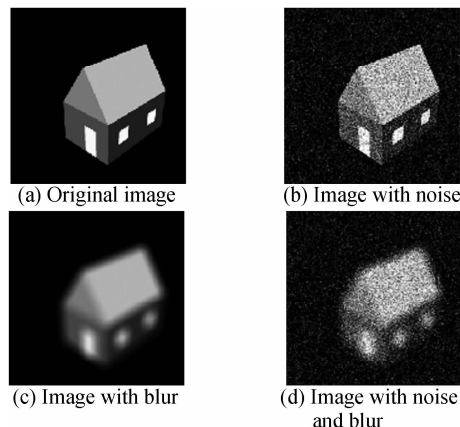


图2 图像加噪声与模糊示意

Fig. 2 Image added noise and blur

从空域上来说,清晰图像的边缘与细节清晰,而模糊图像边缘不够清晰,加噪后,其边缘更为不清晰,如图3所示,图3为边缘处理结果。

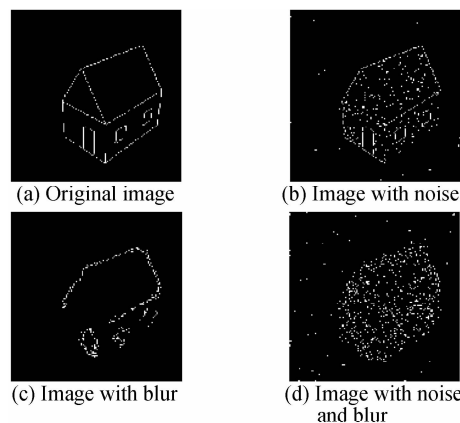


图3 加噪与模糊图像边缘处理示意

Fig. 3 Image added noise and blur with edge processing

从频率域来说,噪声影响整个频率带宽,且其主要效应是影响高频量,而模糊主要抑制高频量.如图4所

示,原图清晰,其频谱丰富,高频量较多;加噪声后,将增加高频分量;模糊后图像的高频分量被抑制,可以看出噪声与模糊在频率域为矛盾的。

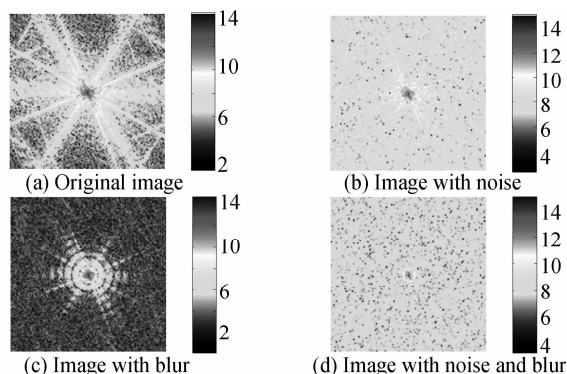


图4 加噪与模糊图像频域处理示意

Fig. 4 Image added noise and blur with frequency processing

## 2 典型清晰度评价方法比对分析

选取基于 Brenne 梯度函数评价方法 (Brenne gradient function method, Brenne)、基于图像变换域评价方法 (Fast Fourier Transform, FFT)、基于熵函数评价方法 (Entropy function method, Ent)、基于点锐度评价方法 (Point sharpness method, Eav)、基于结构相似度的清晰度算法 (Structural similarity algorithm method, SSIM) 等典型评价方法<sup>[4-12]</sup> 进行分析。

对选取的典型图片进行分析,图片缩写分别为

lighthouse(图5)<sup>[18]</sup> 与 house, lighthouse 为全景图像,背景不突出;house 为中心区域图像,背景突出,与望远镜扩展成像模式类似。



图5 全景图 lighthouse

Fig. 5 Whole view image named lighthouse

根据选定的清晰度评价方法,分别对典型图像在不同离焦与模糊条件进行了清晰度评价,评价结果见图6(归一化处理结果)。其中,模糊为离焦模糊,加载的离焦量分别为 2、4、6、8、10、12、15 等像素数值,噪声为高斯噪声,加载的噪声方差量分别为 0.005、0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 等值。图6(a)、(c)分别为图5全景图 lighthouse 与图2中原图加高斯噪声图像,横坐标表示分别加载上述噪声方差量对应的图像;图6(b)、(d)分别为图5全景图 lighthouse 与图2中原图 house 加离焦图像,横坐标表示分别加载上述离焦量对应的图像。

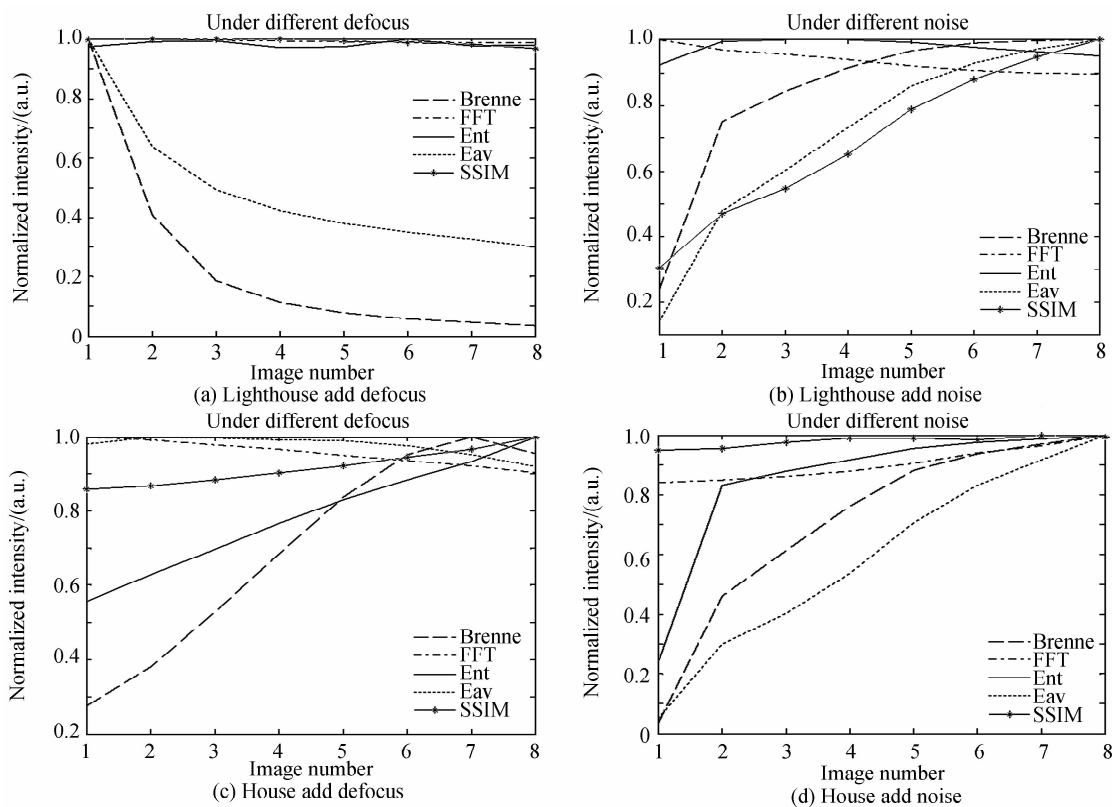


图6 不同图像评价结果

Fig. 6 Image quality evaluation under different condition

由图6可以看出,在不同条件下,不同的评价算法对的图像的评价结果存在差异,全景图与中心区域图评价结果存在差异,模糊与噪声条件下评价结果也存在差异,各评价方法结果也存在差异.因此,对于跟踪发射望远镜扩展成像来说,其为中心区域图,且同时存在噪声与模糊,现有单一评价方法不能满足需求.

### 3 望远镜扩展成像像质评价方法设计

在以往的清晰度评价中,通常都是单独针对模糊或噪声展开评价,通常只是给出一个相对的评价结果,对于望远镜扩展成像来说,其成像时同时受到噪声与模糊的影响,因此,需要同时对噪声与模糊展开评价,给出一个绝对的定量结果,获得图像的成像质量.从图6可以看出,噪声与模糊对图像的影响不一样,尤其是在频率域,噪声与模糊的作用相反,在评价时,可以利用频率域特点进行分析;此外,在图像评价过程中,噪声将降低图像的对比度,为此,在评价时也需考虑对比度.

望远镜扩展成像时,其成像模式为中心区域成像模式.综合考虑频率域特性以及噪声降低图像对比度特性,结合图6分析结果,设计了望远镜扩展成像清晰度评价方法,其原理见图7.

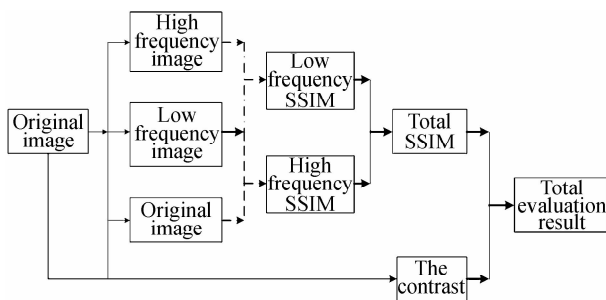


图7 望远镜扩展成像像质评价方法

Fig. 7 Image quality evaluation method for extended imaging

对于待评价图像,首先分别采取低通滤波器与高通滤波器对图像进行滤波,得到低频图像与高频图像,低频图像为包含目标主要信息,高频图像包含目标边缘信息,但一般被噪声所淹没,表现为噪声;其次,利用高频图像与低频图像进行结构相似度比对,得到图像低频结构相似度;同时,利用低频图像与原图像进行结构相似度比对,得到高频结构相似度;高频结构相似性与低频结构相似度综合即得到目标的结构相似度;此外,对目标的亮度调制对比度进行求解,求解时,考虑图像为中心区域成像模式,以图像亮度均值作为阈值,大于阈值的定义为目标,小于阈值的定义为背景,即噪声,以目标与背景的均值来计算调制对比度;最后,将得到的结构相似性与调制对比度相乘综合即得到最终的评测结果.

望远镜扩展成像清晰度评价方法表达式为

$$IQM = (1 - SSIM_H \cdot SSIM_L) \cdot C \quad (3)$$

式中,  $SSIM_H$ 、 $SSIM_L$  分别为高频结构相似度与低频结构相似度;  $C$  为调制对比度.

图像的结构相似度计算公式为<sup>[5,11]</sup>

$$SSIM_{H/L} = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (4)$$

式中,  $l(x, y)$  为亮度比较;  $c(x, y)$  为对比度比较;  $s(x, y)$  为结构信息比较;  $\alpha, \beta, \gamma$  为调节常数,文中均取数值1;  $x, y$  分别代表拟比较的两图像,高频结构相似度计算时代表低频图像与原图,低频结构相似度计算时代表高频图像与低频图像.

亮度比较计算公式为

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (5)$$

式中,  $\mu_x, \mu_y$  代表两比较图像的均值,  $C_1$  为调节常数.

对比度比较计算公式为

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (6)$$

式中,  $\sigma_x, \sigma_y$  代表两比较图像的方差,  $C_2$  为调节常数.

结构信息比较计算公式为

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_x, \sigma_y$  代表两比较图像的方差,  $\sigma_{xy}$  代表两比较图像乘积的方差;  $C_3$  为调节常数.

对于调制对比度,其计算公式为

$$C = \frac{\mu_m - \mu_b}{\mu_m + \mu_b} \quad (8)$$

式中,  $\mu_m, \mu_b$  分别为目标与背景的亮度平均值.

## 4 仿真与实验分析

### 4.1 仿真图像分析

利用提出的跟踪发射望远镜共光路成像清晰度评价方法对 house 图像离焦与加载噪声后的图像进行评价,离焦图像见图8,噪声图像见图9,离焦与噪声图像

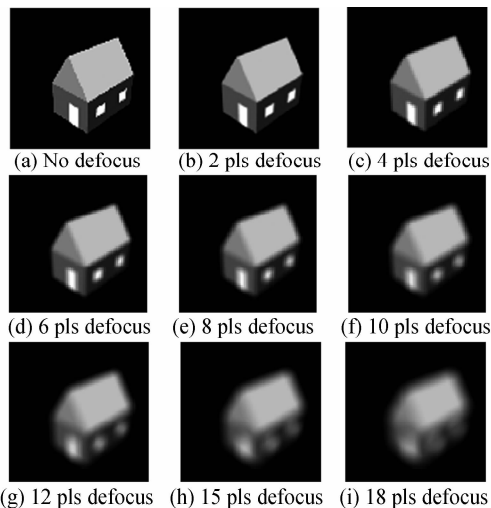


图8 离焦图像

Fig. 8 Image added blur

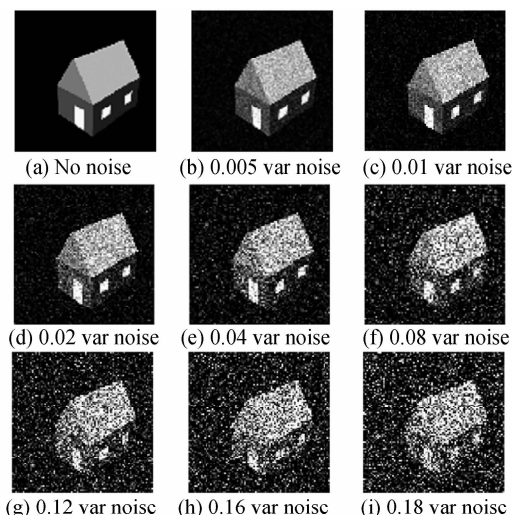


图 9 噪声图像  
Fig. 9 Image added noise

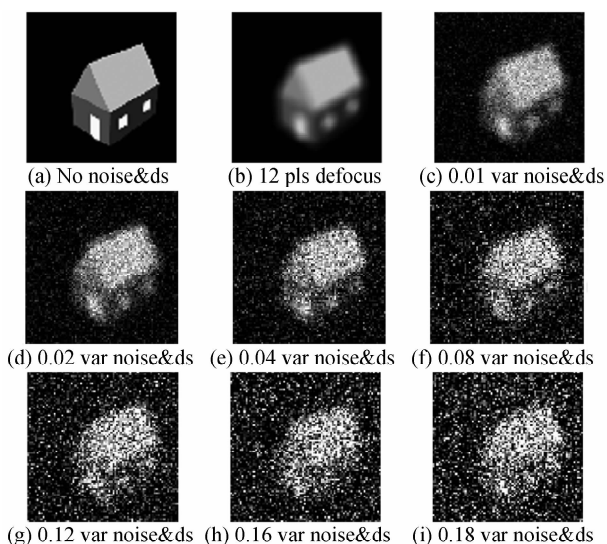


图 10 噪声与模糊图像  
Fig. 10 Image added noise and blur

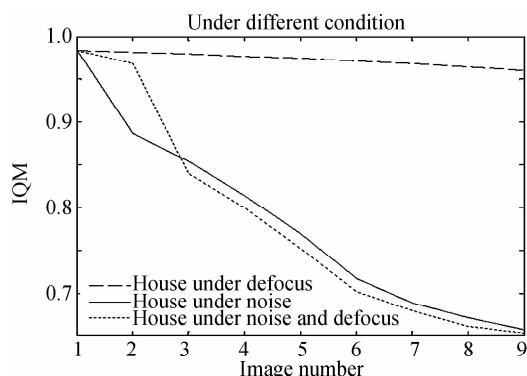


图 11 图像评价结果

Fig. 11 Image quality evaluation results

见图 10,其中,离焦加载量分别在图 8 中各子图像中注明(pls 代表 pixels);噪声加载量分别在图 9 中各子图像中注明(var 代表 variance);图 10 为同时加载离焦与噪声图像,子图像加噪噪声方差量见图中注明,离焦量

加载统一为加载 12 像素离焦量的基础之上(子图注释 &ds 代表加载离焦).利用提出的评价方法对图 8、图 9 以及图 10 各子图像进行了评价,评价结果见图 11.

从图 11 可以看出,所提出的方法可满足同时定量分析噪声与模糊对图像造成的影响,随着模糊量的增大,图像质量 IQM 数值减小,与主观观测结果相似;随着噪声量的增大,IQM 数值减小,也与主观观测结果相似;同时加载离焦与噪声时,其 IQM 值相比于单独加载噪声要小,符合客观规律;同时,图像的评价结果直接为归一化形式,不需要归一化,质量最好时,IQM 数值为 1,质量最差时,IQM 数值为 0,可以采用提出的方法对不同系统的成像能力进行评价.

#### 4.2 实验图像分析

利用提出的方法对实测图像进行评价(实测图像下载于公开网站,其中,前四幅下载于网址<sup>[19]</sup>,第五幅下载于网址<sup>[20]</sup>,第六幅下载于网址<sup>[21]</sup>),实测图像评价结果见图 12,与其他评价方法比较见表 1.从表 1 可以看出,其他评价方法不能较好地评价实测图像,给出的评价与实际不符;从图 12 可以看出,提出的评价方法给出的各子图评价结果与主观观测结果较吻合,且给出的为定量评价,不需要归一化处理;清晰度最好的第二幅图像其评价最大,清晰度最差的四幅图像其评价最小,反映了所提出的图像成像评价方法的准确性、单调性、一致性以及可比对性,也进一步验证了所提出方法的有效性.

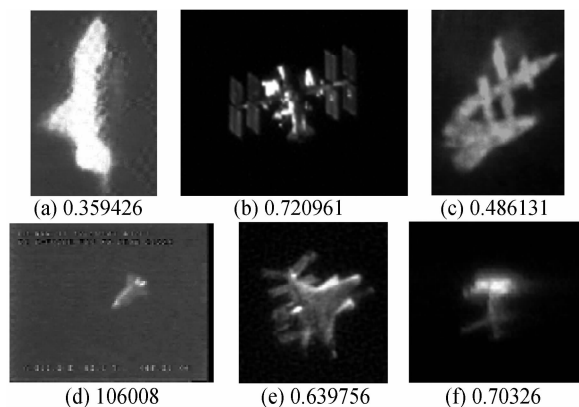


图 12 望远镜实测图像评价结果

Fig. 12 Image quality evaluation results on measurement image

表 1 不同算法下评价价值比较

Table 1 Image quality evaluation under different methods

Image	Method	Bre	FFT	Ent	Eav	SSIM	IQM
4		0.90	0.58	0.70	0.98	1	0.15
1		1	0.79	0.89	1	0.06	0.50
3		0.53	1	1	0.44	0.09	0.67
5		0.38	0.06	0.92	0.83	0.21	0.89
6		0.08	0.01	0.77	0.42	0.53	0.96
2		0.77	0.07	0.79	0.96	0.58	1

## 5 结论

针对现有评价方法单独针对噪声或模糊全景图像评价不足,结合望远镜成像机理特性,设计提出了一种对比度与结构相似度下的无参考成像质量评价方法,给出了其基本原理、具体实现流程以及数学模型,结合仿真图像与实测图像进行了有效性验证.验证结果表明:所提出的方法可满足同时定量分析噪声与模糊对图像造成的影响,随着模糊量的增大,图像质量 IQM 数值减小,与主观观测结果相似;随着噪声量的增大, IQM 数值减小,也与主观观测结果相似;同时加载离焦与噪声时,其 IQM 值相比于单独加载噪声或模糊要小,符合客观规律;同时,图像的评价结果直接为归一化形式,不需要归一化,质量最好时, IQM 数值为 1,质量最差时, IQM 数值为 0;评价结果具有较高的准确性、单调性以及一致性.

### 参考文献

- [1] CVAIEDES J, GUBRUZ S. No-reference sharpness metric based on local edge kurtosis[J]. *International Conference on Image Processing*, 2002, **3**:53-56.
- [2] BAHRAMI K, KOT A C. A fast approach for no-reference image sharpness assessment based on maximum local variation [J]. *Signal Processing Letters* 2014, **21**(6):751-755.
- [3] COHEN E, YITZHAKY Y. No-reference assessment of blur and noise impacts on image quality[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2010, **4**(3): 289-302.
- [4] GUPTA P, TRIPATHI N, BHATEJA V. Multiple distortion pooling image quality assessment[J]. *International Journal of Convergence Computing*, 2013, **1**(1): 60-72.
- [5] WANG Z, LU L, BOVIK A C. Video quality assessment based on structural distortion measurement [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, **19**(2): 121-132.
- [6] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index[J]. *Signal Processing Letters*, 2002, **9**(3): 81-84.
- [7] NILL N B, BOUZAS B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra[J]. *Signal Processing Letter*, 2002, **9**(3): 388-392.
- [8] QIAO Li-yong, XU Li-xin, GAO Min. Infrared image sequence complexity analysis based on multi-attribute decision making[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0311001. 乔立永, 徐立新, 高敏. 基于多属性决策的红外序列图像复杂度分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0311001.
- [9] WANG Hong-nan, ZHONG Wen, WANG Jing, *et al.* Research of measurement for digital image definition [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(7): 828-831. 王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2004, **9**(7): 828-831.
- [10] WANG Jian, CHEN Hong-bin, ZHOU Guo-zhong, *et al.* An improved brenner algorithm for image definition criterion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 855-858. 王健, 陈洪斌, 周国忠, 等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 855-858.
- [11] FAN Yuan-yuan, SHEN Xiang-heng, SANG Ying-jun. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2485. 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.
- [12] JAISWAL A, TRIVEDI M, BHATEJA V. A no-reference contrast assessment index based on foreground and background [C]. *Engineering and Systems (SCES)*, 2013 Students Conference on. IEEE, 2013: 1-5.
- [13] WANG Z, BOVIK A C, LU L. Why is image quality assessment so difficult? [C]. *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2002 IEEE International Conference on. IEEE, 2002, 4: IV-3313-IV-3316.
- [14] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a “completely blind” image quality analyzer [J]. *Signal Processing Letters*, 2013, **20**(3): 209-212.
- [15] SERIR A, BELOUCHRANI A. Multiplicative Multiresolution decomposition with perfect reconstruction [C]. *Signal Processing and Information Technology*, 2003. ISSPIT 2003. Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on. IEEE, 2003: 30-33.
- [16] TAN Bi-tao, CHEN Hong-bin, WANG Qun-shu. Jitter of the electro-optical system based on image-resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0411001. 谭碧涛, 陈洪斌, 王群书. 基于成像分辨率的光电成像系统抖动要求[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0411001.
- [17] TAN Bi-tao, CHEN Hong-bin, WANG Qun-shu, *et al.* Sensitivity analysis method on detecting ability of electro-optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1340-1344. 谭碧涛, 陈洪斌, 王群书, 等. 光电系统探测能力敏感度分析方法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(11): 1340-1344.
- [18] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, *et al.* LIVE image quality assessment database release 2, <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [19] <http://www.satobs.org/telescope.html>.
- [20] [http://www.popastro.com/help/help.php?title\\_pag=Viewing+the+ISS+\(and+other+satellites\)](http://www.popastro.com/help/help.php?title_pag=Viewing+the+ISS+(and+other+satellites)).
- [21] <http://www.astrosurf.com/luxorion/satellites-artificiels2.htm>.