

光电系统图像质量评价方法综述

矫英祺,任国全,李冬伟
(军械工程学院,河北 石家庄 050003)

摘 要:针对图像质量评价方法对于评估光电系统成像性能的重要性,本文结合国内外研究成果,综合论述了图像质量的主观评价法和客观评价法。重点对常用的一些图像质量客观评价方法进行了分析和论述,最后探讨了光电系统图像质量评价方法的发展趋势。

关键词:光电系统;主观质量评价;客观质量评价;结构相似度

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.09.002

Overview of image quality evaluation methods for photoelectric system

JIAO Ying-qi, REN Guo-quan, LI Dong-wei
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the importance of image quality evaluation for the photoelectric system imaging performance, combined with the foreign and domestic studies, the subjective assessment and objective assessment of image quality are introduced. Some common objective assessments of image quality are mainly discussed and analyzed, and the development trend of image quality evaluation method for photoelectric system is discussed.

Key words: photoelectric system; subjective quality assessment; objective quality assessment; structural similarity

1 引言

随着现代军事科学技术的快速发展,在现代化高新技术战争条件下,光电成像系统作为情报收集、火控等设备在世界国防领域得到了高度重视,在武器装备侦察系统中的地位日趋重要。光电成像系统主要用于对战区进行侦查、监视、捕获目标并进行跟踪、识别、测距,控制精确制导武器的投放及目标指示等,因此光电成像系统成像性能的好坏直接影响着武器装备的战斗力。通过对所成图像质量进行评价已经成为评估光电成像系统成像性能的一个重要手段。因此,对光电成像系统图像质量评价方法的研究是一个重要的研究方向。

图像质量通常是指人们对一幅图像视觉感受及评价,一般采用图像的逼真度和图像的可懂度来对其进行评判^[1]。图像质量评价的工作原理为:首先用物理方法对图像的物理特性进行度量,然后将度量值与规定标准进行比较,最后利用数字模型来度量图像质量。

很多年前,人们就渴望找到一种可以定量评价图像的真实性和可懂性,作为评估和设计成像系统的一个准则。但是目前对人眼视觉感知的理解还不够。特别地,科学家们还没有找到一个可以有效地定量描述人眼视觉特性的方法,所以对于图像质量评价系统需要进行更进一步研究。

目前,图像质量评价方法主要分为主观评价方法和客观评价方法两大类^[2-3]。

2 图像质量主观评价法

主观评价方法通过人主观感受对图像质量进行评价,直接反映给人眼的感觉相对较为准确。主观评价法要依赖评价人员的评估结果,评价人员主要由专业人员和非专业人员组成。评价人员的选择应该具有广泛的代表性,并由一定的判断分析能力,能

作者简介:矫英祺(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为振动与冲击防护技术。E-mail:yingqijiao@qq.com

收稿日期:2013-12-23

够较快地接受和掌握评价方法^[4]。主观评价法中的每个过程都应该遵循既定的程序。

主观质量评价方法步骤如下:

首先,由一组评价人员根据一些事先规定的评价标准和自身的经验对待评价图像进行评估;然后,根据所有评价人员的评估结果进行分析、处理,计算出平均分;最后,根据分析计算的结果得出待评价图像的主观评价结果。主观评价有两种标准,即绝对标准和相对标准,主观质量指标如表1所示。

表1 主观质量指标

等级	绝对标准	相对标准
1	非常好	一组中最好
2	好	比该组平均水平好
3	中等	该组平均水平
4	差	比该组平均水平差
5	非常差	一组中最差

主观评价来自评价人员对图像质量的主观评定,如 MOS(Mean Opinion Score)。但主观评价费时费力,易受观察者的知识背景、经验、测试环境等多种因素的影响,实时性、稳定性、可移植性较差。尽管这种方法应用广泛和可靠,但是评价结果总是限于一些特定条件。此外,主观评价方法无法提供建设性的意见来改善图像质量,所以 MOS 几乎很少应用在成像系统中。

3 图像质量客观评价法

因为人类是所有图像、视频信息的最终感知者,最明显的质量评价方法就是主观评价法。然而,在实际应用中,主观评价往往不方便,耗时、成本高,而且很难嵌入到成像系统中,因此目前主要研究以客观评价方法为主。客观图像质量评价是设计一个计算模型,可以自动且精确地对图像的质量进行评价或者预测,“准确”的意思是评价或者预测的结果要和人的主观视觉一致。

客观评价法按照是否需要原始图像分为三种^[5-7]:全参考质量评价(Full-Reference QA),需要将“失真”图像与参考图像进行比较得出评价结果;所参考质量评价(Reduced-Reference QA),可以从参考图像得到部分特征信息,并利用这些信息完成对“失真”图像质量的评价;无参考质量评价(No-Reference QA),不借助任何参考图像的信息,独立完成对图像质量的评价。

3.1 传统的图像质量评价方法

3.1.1 均方误差法(MSE)

设参考图像和被测图像均由 $M \times N$ 个像素组成,并且 $x = 1, 2, \dots, M, y = 1, 2, \dots, N$ 。则两个图像之间的均方误差为:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\hat{a}(i,j) - a(i,j)]^2}{M \cdot N} \quad (1)$$

式中, $a(i,j)$ 表示被测图像中对应的灰度值; $\hat{a}(i,j)$ 表示被测图像中对应的灰度值。

均方误差法是被测图像与参考图像间的简单数学统计差别,计算公式直观、严格,计算简单,这些优点使得该方法一直得到广泛的应用;但是,该方法需要逐像素进行比较,所有像素点同样对待,在有些情况下,通过该方法所求得的结果与人主观视觉感受不一致。

3.1.2 峰值信噪比法(PNSR)

峰值信噪比法(PNSR)本质上与 MSE 相同,其表达式为:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (2)$$

峰值信噪比的方法与均方误差法类似,该方法需要逐像素进行比较,所有像素点同样对待在有些情况下,通过该方法所求得的结果与人主观视觉感觉不一致。

PSNR 与 MSE 同样都需要逐像素进行比较运算,但是这种基于对图像随机误差进行统计运算的方法只能从数学角度上总体反映被测图像和原始图像的差别,而没有考虑到人的视觉感知特性,其结果常与人们主观视觉效果不一致,并不能完全反映图像失真对图像内容、边缘和结构等构成的影响,不能完全反映图像的质量,因而不能良好地表达人眼的对比度敏感特性。

3.1.3 奇异值分解法(SVD)

矩阵 A 为 $m \times n$ 阶实矩阵,它的奇异值分解表示为: $A = USV'$, 其中 U, V 为正交矩阵,即 $UU' = 1, VV' = 1$ 。 S 为对角矩阵,即 $S = \text{diag}(S_1, S_2, \dots, S_k, 0, \dots, 0)$, $k = \text{rank}(A)$, $S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_k$ 。通过奇异值分解来提取图像特征,然后进行图像特征差异性比较。可以求得参考图与测试图的奇异值向量差 $D = S_1 - S_2$; $D_s = \{d_i\}; i = 1, 2, \dots, k$ 。 S 的元素从大到小排列,在数值上成指数递减的变化趋势,而且 S 特征向量中的前面几个分量包含了图像代数属性

的主要信息。所以通过公式:

$$W_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^k S_i}, i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

求得奇异值权重向量。

定义基于权重奇异值分解的质量评价测度 B_SVD 如下:

$$B_SVD = \frac{\sum_{i=1}^k W_i |d|}{\sum_{i=1}^k S_i}, i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

式中, d 越小, 得出的 B_SVD 值越小, 表示两幅图像差别越小, 即所测试图像质量越好。

3.2 基于结构信息的图像质量评价方法

自然图像是由像素高度结构化的, 尤其是空间领域的像素, 具有很强的相关性, 而且像素间的关系包含了大量的视觉信息。尽管大部分失真图像都被线性传输所分解, 但是这种相关性并没有被消除。Wang 等^[8] 研究人员在多年对图像处理、图像压缩及图像的视觉质量评价的工作基础上, 通过图像像素之间的相关性, 提出了基于结构相似度 (SSIM) 的图像质量评价方法。SSIM 算法将图像分成亮度、对比度和结构三部分, 计算三部分的失真获得图像分块的整体失真度。算法的理论依据是人眼视觉系统 (Human Visual System, HVS) 高度适合于提取视觉场景中的结构信息, 使测量获得结构信息的改变与感知图像质量的变化非常接近。因此, 如果结构信息相似则可认为前后图像质量变化不大, 即质量损失不大。

SSIM 定义为:

$$SSIM(X, Y) = l(X, Y)^\alpha c(X, Y)^\beta s(X, Y)^\gamma \quad (5)$$

$$l(X, Y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (6)$$

$$c(X, Y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (7)$$

$$s(X, Y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (8)$$

式中, X 为原始图像块; Y 为失真图像块; σ_x, σ_y 为方差; σ_{xy} 为协方差; μ_x, μ_y 表示 X, Y 的局部亮度均值; $c(X, Y)$ 为对比度相关函数; $s(X, Y)$ 为结构相关函数; $l(X, Y)$ 为 X, Y 亮度相关函数。 C_1, C_2, C_3 和 α, β, γ 都是常数。

SSIM 从均值、方差、结构三个层次比较图像信

号, 一般取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 时, 可以得到:

$$SSIM(X, Y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_x\sigma_y + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (9)$$

对所有 N 个子图像的 SSIM 值求平均, 可得到整幅图像的质量值, 即平均结构相似度 MSSIM:

$$MSSIM(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N SSIM(X_i, Y_i) \quad (10)$$

根据 SSIM 的定义, MSSIM 的值越大, 说明图像 X 和 Y 方向越相似。SSIM 模型是一种比对应像素点间绝对误差更好的, 在局部上考虑了像素间相关性的误差度量方式。SSIM 方法因其与人主观评价的良好一致性而被广泛应用和研究。MSSIM (Mean Structural Similarity) 在过去些年间展现出了它的稳定性、鲁棒性和精确性, 它也被广泛的研究推广, 例如, MGSSIM 和 MDESSIM。

针对 SSIM 不能较好地评价严重模糊降质图像的问题, Chen 等^[9] 提出了一种基于灰度结构相似度的方法 (GSSIM)。

$$GSSIM(X, Y) = l(X, Y)^\alpha c(X', Y')^\beta s(X', Y')^\gamma \quad (11)$$

$$MGSSIM(X, Y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N GSSIM(X_i, Y_i) \quad (12)$$

式中, X', Y' 为图像块的灰度坐标。实践表明 GSSIM 方法比 SSIM 方法的评价效果更佳优异, 尤其是高斯模糊图像。

戚尚菊等^[10] 在 SSIM 的基础上, 提出了一种新颖的、基于边缘的图像质量评价方法 (ESSIM), 该方法充分考虑了图像的边缘信息和 HVS 的关系, 能较好地估计图像纹理结构遭到破坏的模糊图像的质量。王德心等^[11] 设计了一种改进的结构相似度评价方法。该方法考虑到小波分解能够模拟对比敏感度特性, 利用不同空间频带的小波系数进行 CSF 特性加权, 分别对待测试图像和参考图像提取出人眼感兴趣的中高频信息, 然后进行结构相似度对比, 有效克服了 SSIM 方法不能对失真图像进行有效评价的缺陷。Zhu 等^[12] 根据图像结构信息和人类视觉特性, 基于对图像内容的人类视觉感知力, 提出了一种新的图像质量评价方法。通过算术建模评估人类对图像质量的主观视觉感知, 这就保证了结构相似模型能够满足图像处理的应用需要。Liu 等^[13] 考虑到人眼视觉对于边缘信息的敏感性, 介绍了一种包含边缘相似度和结

构相似度的综合评价方法 (TESSIM)。Xie 等^[14]通过分析光电成像系统的数学模型和图像模糊的机理,提出了一种构建参考图像并运用 SSIM 进行图像质量评价的无参考图像质量评价方法 NRSS (No-Reference Structural Sharpness)。该方法通过一个低通滤波器构建参考图像,然后通过计算测试图像与参考图像之间的结构相似性来评价图像质量,充分利用了成像系统的数学模型以及结构相似指数的优势。实验结果显示这种新方法的质量评价效果与主观评价、全参考评价具有相同的评价效果。

3.3 其他图像质量评价方法

为了提高图像质量评价准确率,李凌等^[15]提出了一种采用最小二乘支持向量机 (Least Square support vector machines, LSSVM) 的图像质量评价方法。该方法首先采用 PSNR、SSIM 分别对图像质量进行评价,得到的评价值作为描述图像质量的参数,然后输入到 LSSVM 进行分析,建立新的图像质量分类器,采用建立的分类器对图像质量进行仿真评价。黄君等^[16]在现有的图像视觉理论基础上,建立基于视觉特性的数学模型,并结合奇异值分解提出了一种新的图像质量评价方法。

Mou 等^[17]认为比较参考图像与测试图像的边缘位置也可以测量图像结构的失真程度,成为一种有效的图像质量评价指标,而且边缘可以通过卷积 LOG 滤波器从图像的最基本结构信息中检测出来。基于一个简单的逻辑,提出了一种全新的评价方法 NSER (Non-Shift Edge based Ratio)。Pina Marziliano^[18]提出了一种基于边缘检测和宽度测量的模糊图像的全参考评价,该方法主要依赖于对退化图像的特征和参考图的比较,有效地对模糊图形进行评价。左博新等^[19]提出了一种基于边缘检测的无参考模糊图像评价模型,通过测量梯度图像的梯度边缘信息,对模糊退化图像进行无参考评价。实验表明该模型准确地反映了人对模糊图像质量的主观感受。Liu 等^[20]认为图像梯度能够传达重要的视觉信息,而且对于场景理解至关重要。基于此,图像结构上的相对改变就能够有效地获取出来。提出了一种将亮度和相对结构改变相结合的方法来有效地评价图像质量。亮度和相对结构的改变对图像质量的影响会通过一个适当的方法进行综合协调从而获得图像质量的总体评分。针对灰度图像,林莹等^[21]提出了一种

采用图像的梯度来衡量图像清晰度的评价方法 MG-DM (Morphological Gradient Definition Metric)。该方法通过多种形态学结构元素在图像上分别计算出对应的梯度信息,将梯度信息叠加后得到图像的形态学梯度边缘,利用该图像梯度边缘信息作为图像质量清晰度评价的测度,得到图像清晰度评价结果。文献[22]提出了一种新的质量评价方法 VGS (Visual Gradient Similarity),并且将一些人类对图像梯度的视觉特性融入到其中。何中翔等^[23]从图像构像质量和几何质量两个方面探讨了图像客观质量评价方法。最近 10 年里,专家学者们提出了许多著名的方法,例如 PSNR-HVS-M^[24], visual information fidelity (VIF)^[25], visual signal-to-noise ratio (VSNR)^[26] 和 most apparent distortion (MAD)^[27]。

4 总结与展望

准确评价图像质量对光电成像系统性能优劣的评估起到了很大的作用。本文从主观评价和客观评价两个方面对图像质量评价的方法进行了论述,并着重介绍了客观评价方法。近些年,针对当前研究最多的全参考图像质量评价方法,国内外的研究者均不同程度地在评价算法中采用 HVS 特性,这可以有效克服客观评价与主观评价评判结果不一致的问题。因此,将主客观评价方法相结合将成为图像质量评价算法的一个发展趋势。

尽管如此,目前评价效果较好的一些评价方法要么是全参考评价就是弱参考评价,因为在许多实际应用场合无法获得参考图像,因此发展对无参考 (NR) 图像质量评价方法的研究更具价值。无参考图像质量评价又称“盲评价”,是一个比较新的研究领域。近些年,大量的 NR 方法被研究出来,然而,它们的大部分都或多或少有缺点,限制了它们在实际工程中的应用。例如,一些需要变换,一些模型需要训练过程,一些的计算结果没有约束。由此可见,无参考图像质量评价方法是图像质量评价领域中的难点,同时它也将成为人们研究的热点,能够准确评价图像质量并与 HVS 具有良好一致性的 NR 方法将具有重要的使用价值。

参考文献:

- [1] LIU Hui, YUAN Hao, LI Hong-xia. Research on Quality Assessment Methods of Remote Sensing Image[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(10): 24-26. (in Chinese)

- 刘慧,袁昊,李洪霞. 遥感图像质量评估方法研究[J]. 现代电子技术,2011,34(10):24-26.
- [2] WANG Yue-hua,TAO Zhong-xiang. Overview of Quality Evaluation Methods of Fused Infrared and Visible Images[J]. Infrared,2012,33(6):7-11. (in Chinese)
王跃华,陶忠祥. 红外与可见光图像融合质量评价方法综述[J]. 红外,2012,33(6):7-11.
- [3] ZHU Li-juan. Time Optimization Algorithm of Full Reference Image Quality Assessment[J]. Laser & Infrared, 2013,43(8):947-950. (in Chinese)
朱丽娟. 一种时间优化的全参考图像质量评价算法[J]. 激光与红外,2013,43(8):947-950.
- [4] WANG Rong,LI Zhi,LI Li-hua. Overview of Quality Evaluation of Video Image[J]. Journal of Chinese People's Public Security University: Science and Technology, 2012,1(1):59-62. (in Chinese)
王蓉,李志,李丽华. 视频图像质量评价综述[J]. 中国人民公安大学学报:自然科学版,2012,1(1):59-62.
- [5] LI Zuo-lin,LI Xiao-hui,MA Ling-ling, et al. Research of Definition Assessment Based on No-Reference Digital Image Quality[J]. Remote Sensing Technology and Application,2011,26(2):239-246. (in Chinese)
李祚林,李晓辉,马灵玲,等. 面向无参考图像的清晰度评价方法研究[J]. 遥感技术与应用,2011,26(2):239-246.
- [6] LU Fangfang,ZHAO Qunfei,YANG Genke. Color Image Quality Assessment Based on Structural Similarity[J]. Journal of Donghua University: Eng. Ed., 2010,27(4):443-450.
- [7] YIN Ying. Non-Reference Blur Image Quality Assessment Based on General Regression Neural Network[J]. Laser & Infrared,2013,43(4):466-470. (in Chinese)
殷莹. 基于广义回归神经网络无参考模糊图像质量评价[J]. 激光与红外,2013,43(4):466-470.
- [8] Zhou Wang,Alan C B. A Universal Image Quality Index[J]. IEEE Signal Processing,2002,9(3):81-84.
- [9] G Chen,C Yang,S Xie. Gradient-based structural similarity for image quality assessment[J]. IEEE Trans. Image Process,2006:2929-2932.
- [10] QI Shang-ju,JI Xiu-hua. Blurred Image Quality Assessment Based on Edge Structural Similarity[J]. COMPUTER ENGINEERING & SCIENCE, 2011, 33(2):133-136. (in Chinese)
戚尚菊,纪秀花. 基于边缘的结构相似度模糊图像质量评价[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(2):133-136.
- [11] WANG Dexin,ZHANG Yu-ye,LI Kai-duan. A Kind of Distorted Image Quality Assessment Method[J]. Science Technology and Engineering,2010,10(23):5759-5762. (in Chinese)
王德心,张玉叶,李开端. 一种失真模糊图像的质量评价方法[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23):5759-5762.
- [12] Zhu Li,Wang Guoyou,Liu Ying. Image quality evaluation method based on structural similarity[J]. Proc. of SPIE, 2007,6790:67905L.
- [13] Liu Junyao,Wang Huijing. Image Quality Assessment Based on Structure and Edge Similarity[J]. IEEE Trans. Intelligent Computation Technology and Automation, 2011:1105-1108.
- [14] Xie Xiaofu,Zhou Jin,Wu Qinzhang. Assess Image Blur in Photoelectric Imaging System[J]. Proc. of SPIE, 2010, 7658:765803.
- [15] LI Ling,LIU Zhi-wu,LI Yong-chang. Modeling and Simulation of Image Quality Evaluation[J]. COMPUTER SIMULATION,2012,29(3):284-287. (in Chinese)
李凌,刘志武,李永昌. 图像质量评价的建模与仿真研究[J]. 计算机仿真,2012,29(3):284-287.
- [16] HUANG Jun,BAO Xiao-min,DU Jing-jing. Image Quality Assessment Based on HVS and Singular Value Decomposition[J]. Industrial Control Computer, 2012, 25(3):39-40. (in Chinese)
黄君,包晓敏,杜晶晶. 基于HVS和奇异值分解的图像质量评价[J]. 工业控制计算机,2012,25(3):39-40.
- [17] MOU Xuanqin,ZHANG Min,XUE Wufeng, et al. Image Quality Assessment Based on Edge[J]. Proc. of SPIE, 2011,7876:78760N.
- [18] Pina Marziliano, Frederic Dufaux. Perceptual blur and ring-ing metrics: application to JPEG2000[J]. Signal Processing:Image communication,2004,19(2):163-172.
- [19] ZUO Bo-xin,MING De-lie,AO Zheng-guang, et al. No-Reference Blurred Image Based on Image Structure and the Quality Assessment Method of Its Restoration Image[J]. GEOMATICS WORLD,2008(1):13-20. (in Chinese)
左博新,明德烈,敖争光,等. 基于图像结构的无参考模糊图像及其复原图像质量评价方法[J]. 地理信息世界,2008(1):13-20.
- [20] Anmin Liu,Weisi Lin, Manish Narwaria. Image Quality Assessment Based on Gradient Similarity[J]. IEEE Trans. Image Process,2012,21(4):1500-1512.
- [21] LIN Ying,ZHANG Zhao-dong,LIU Jing-xia, et al. Gray

- Image Quality Blind Assessment Based on Morphological Gradient[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(1): 264 – 266. (in Chinese)
- 林莹, 张兆东, 刘景夏, 等. 基于形态学梯度的灰度图像质量盲评价[J]. 计算机应用于软件, 2012, 29(1): 264 – 266.
- [22] Zhu Jieying, Wang Nengchao. Image Quality Assessment by Visual Gradient Similarity [J]. IEEE Trans. Image Process. , 2012, 21(3): 919 – 933.
- [23] HE Zhong-xiang, WANG Ming-fu, YANG Shi-hong, et al. Research on Objective Quality Assessment of Remote Sensing Image [J]. JOURNAL OF ENGINEERING GRAPHICS, 2011, 6: 47 – 52. (in Chinese)
- 何中翔, 王明富, 杨世洪, 等. 遥感图像客观质量评价方法研究[J]. 工程图学学报, 2011, 6: 47 – 52.
- [24] N Ponomarenko, F Silvestri, K Egiastian, et al. On between-coefficient contrast masking of DCT basis function [C]//Proc. 3 rd Int. Workshop Video Process. Qual. Metrics Consum. Electron. , Scottsdale, AZ, 2007.
- [25] H R Sheikh, A C Bovik. Image information and visual quality[J]. IEEE Trans. Image Process. , 2006, 15 (2): 430 – 444.
- [26] D M Chandler, S S Hemami. VSNR: A Wavelet-based visual signal-to-noise-ratio for natural images [J]. IEEE Trans. Image Process. , 2007, 16(9): 2284 – 2298.
- [27] E C Larson, D M Chandler. Most apparent distortion: Full-reference image quality assessment and the role of strategy [J]. J. Electron. Imaging, 2010, 19(1): 011006.