

文章编号 1004-924X(2013)09-2260-06

基于双重模型客观评价微光像增强器的分辨力

史继芳, 杨 斌, 韩占锁, 解 琪*, 孙宇楠

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:以光学调制度模型和归一化互相关模型为基础,以模板匹配和光学调制度双重判据为核心算法,研究了微光像增强器分辨力的客观评价方法,构建了微光像增强器分辨力客观评价系统。光学调制度模型和归一化互相关模型既相互独立又相辅相成。首先,利用归一化互相关模型中的模板匹配系数进行定位和初步评价;然后,用光学调制度模型进行定量分析。这种先定性后定量的图像处理模式提高了微光像增强器分辨力测量的准确性和重复性,实现了对微光像增强器分辨力客观、准确的评价,避免了目视观察法受人的主观因素影响的弊端。实验结果表明,由 CCD 采集得到的微光像增强器分辨力与人眼观测结果具有较好的一致性,提高了本评价方法的客观性和准确性,该方法也可推广至 CCD、ICCD、EMCCD 等可见光探测成像系统分辨力的客观评价。

关键词:微光像增强器;图像处理;分辨力;客观评价;模板匹配;调制度

中图分类号: TN144; TN223 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132109.2260

Objective evaluation of resolution for low-light-level image intensifier based on dual-model

SHI Ji-fang, YANG Bin, HAN Zhan-suo, XIE Qi*, SUN Yu-nan

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

* Corresponding author, E-mail: xieqix_i_e@163.com

Abstract: On the basis of an optical modulation model and a normalized correlation model, an objective evaluation method for the resolution of a low-light-level image intensifier was explored by using the dual criterion of template matching and optical modulation as core algorithms. A set of resolution objective evaluation system for the low-light-level image intensifier was constructed. In the method, the optical modulation model and the normalized correlation model are independent of each other and also cannot be separated from each other. Firstly, the template matching coefficients in the normalized correlation model were used to performed the location and preliminary evaluation, then the optical modulation model was taken to do a quantitative analysis. The image processing scheme in first qualitative analysis then the quantitative analysis improves the accuracy and repeatability of resolution test for the low-light-level image intensifier, implements the objective and accurate evaluation for low-light-level image intensifier and avoids the shortcomings of visual observation method which is influenced by human's subjective factors. The experiments demonstrate that the resolution of the image captured by CCD has good consistency with that of visual observation result by human eyes. The method is also

收稿日期: 2013-02-24; 修订日期: 2013-05-30.

基金项目: 微光夜视技术国防科技重点实验室基金资助项目(No. J20110509)

suitable for the evaluation of resolutions of other visible light imaging systems.

Key words: low-light-level image intensifier; image processing; resolution; objective evaluation; template match; modulation

1 引言

微光像增强器是能将微弱光照射下的景物通过光阴极的光电子转换、电子倍增器增强和荧光屏电-光转换再现为可见图像的多波段、多功能的光电子成像器件,可用于紫外光、可见光、近红外光、X射线和 γ 射线照射下的景物的探测、增强和成像,在微光夜视、夜盲助视、天文观测、X射线(γ 射线)图像增强、医疗诊断和高速电子摄影快门等技术中得到了广泛应用^[1]。分辨力是微光像增强器调制传递函数(MTF)曲线2%~3%调制度对应的空间频率,是反映微光像增强器探测性能的重要参数之一,决定着微光夜视系统在 10^{-3} ~ 10^{-1} lx 照度时的作用距离和图像清晰度^[2-3]。传统的微光像增强器分辨力的测量方法是将显微镜作为观测工具的目视观察法,这种方法具有简单、直观、方便的优点,但易受人的主观因素影响^[4-6]。本文通过一套带有低噪声高分辨率 CCD 摄像机的分辨力自动测量装置进行图像采集,由图像处理软件将 CCD 摄像机采集的微光增强器荧光屏上的分辨力靶图像进行客观评价,其评价算法采用基于不同原理的双重模型,即归一化互相关模型和光学调制度模型,两模型互相独立又相辅相成,通过调制度判据模型和模板匹配算法相结合的双重独立判据,实现了对微光像增强器分辨力的客观评价。

2 微光像增强器分辨力测量系统组成

微光像增强器分辨力测量系统由光源组件、USAF1951 分辨力靶、平行光管、成像物镜、测试暗箱、CCD 摄像机、计算机和电源等组成。其中,光源组件采用均匀性高于 99% 的漫射弱照度光源,为客观评价微光像增强器的分辨力奠定了基础。CCD 采用美国 Roper Scientific, Inc 公司的 COOLSNAP K4 摄像机,其分辨力为 $2\ 048 \times 2\ 048$, 配备的高传递函数成像物镜的焦距为 100

mm,采集的分辨力靶标图像中各个靶标单元的空间位置和大小不变,降低了软件处理中生成靶标单元标准模板的难度,提高了处理速度。所用 CCD 摄像机带有制冷单元和温控器,大大消除了 CCD 本身的电子噪声和热噪声,为软件分析和处理微光增强器的分辨力提供了硬件保障。分辨力测量系统如图 1 所示。

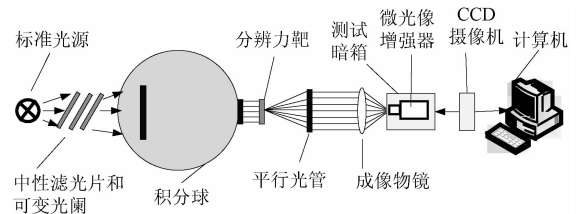


图 1 分辨力测量系统示意图

Fig. 1 Diagram of resolution measurement system

3 微光像增强器分辨力客观评价算法及评价方法

3.1 微光像增强器分辨力客观评价算法

为克服目视观察法的局限性,人们一直在进行分辨力客观测试的研究,一般采用 CCD 取代人眼,计算机采集分辨力图像,用软件对采集的图像进行处理,实现对分辨力的客观评价^[7-10]。但各种图像处理算法是在特定的应用背景下为适应某种具体的情况产生的,在微光器件分辨力的定量测量领域,还存在一定的局限性,表现为缺乏准确性和重复性甚至结果反转^[11-13]。

(a) 调制度判据模型

光学调制度 C 的计算公式为:

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (1)$$

式中: I_{\max} 和 I_{\min} 分别为最大和最小光强。

(b) 模板匹配算法模型

模板匹配算法是从整体上研究分辨力靶图像中待定分辨力单元与理想模板(即目标的最初形态)相似性程度的算法。理想模板是软件生成的二维数组,其大小和方向与特定分辨力单元图像

区域一致,其中对应于分辨力单元图像黑色靶线的矩阵区域设置为 0,其它区域设置为 255。模板图像和待匹配图像上的搜索窗口之间的相关性可以用归一化的相关函数计算,公式为:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S^{i,j}(m, n) \times T(m, n)}{\sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [S^{i,j}(m, n)]^2} \times \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [T(m, n)]^2}}, \quad (2)$$

式中: T 为标准模板,是一个大小为 $M \times N$ 的二维数组, $S^{i,j}$ 为采集的图像中待匹配的子图, i, j 为这块子图的左上角像素点在采集图像中的坐标^[14]。标准模板和分辨力单元的套准,可以采用相关函数的最大值来实现。

将光学调制度引入分辨力客观评价中,并将其量化结果作为一项独立判据。模板匹配算法作为一种独立的分析算法应用到分辨力客观评价中,其匹配系数作为独立判据可以定性和定量地衡量靶标刻线组是否清晰,且作为搜索算法,可以搜索到某一特定分辨力所对应刻线组位置,为调制度算法提供位置索引。本文方法将调制度模型和模板匹配算法模型相结合,两者优缺点互补。首先将归一化互相关模型中的匹配系数作为独立判据,不仅能够定性衡量靶面刻线组是否清晰,还能够搜索到某一特定分辨力所对应的靶线组位置,为后续计算锁定图像处理区域。然后将光学调制度模型作为另一个独立判据可定量得到分辨力数据,从而提高该评价方法的客观性、精确性和准确性。

3.2 微光像增强器分辨力的客观评价方法

所采用的分辨力客观评价方法以调制度判据模型和模板匹配算法模型为基础,编写分辨力客观评价软件对采集到的图像进行处理,确定被测微光像增强器可分辨靶线位置、线条宽度及空间频率,实现对像微光增强器分辨力的客观评价。

分辨力客观评价软件的界面如图 2 所示,主要步骤为:

(1) 采集背景及分辨力靶图像

首先采集 CCD 摄像机输出的背景图像,即在暗室中关掉标准光源,CCD 处于工作状态下,打开镜头,连续采集多帧图像,并将多帧图像的平均值图像作为背景图像。背景图像包含固定图案噪

声和坏像素输出。然后,打开标准光源,采集微光像增强器荧光屏上的分辨力靶图像。将扣除背景噪声后的分辨力靶图像作为后续的处理图像。

(2) 设定 ROI 区域

ROI(Region of Interest)区域即采集的分辨力靶图像中需进行图像处理的区域,该区域为被测微光像增强器分辨力靶图像所在的矩形区域(图 2 中的红色框,彩图见文章电子版)。定义 ROI 区域可以避免处理分辨力靶图像以外的区域,减少计算量。

(3) 生成靶线单元标准模板

标准模板是指依据分辨力靶图像中各个分立靶标单元的靶线数及形状和尺寸生成的理想靶标图像。

对于 USAF1951 分辨力靶,其每个靶标单元由三横三竖的矩形靶线组成,6 根靶线大小相等,靶线长宽比为 5:1,靶线宽度同时亦为等距分布的 3 根横靶线或 3 根竖靶线之间的间距,横靶线组和竖靶线组之间的距离为靶线宽度的 2 倍。相邻靶标单元的尺寸大小的递推公比为 $\frac{1}{\sqrt{2}}$,即每隔 6 个单元,靶线宽度递减一半。

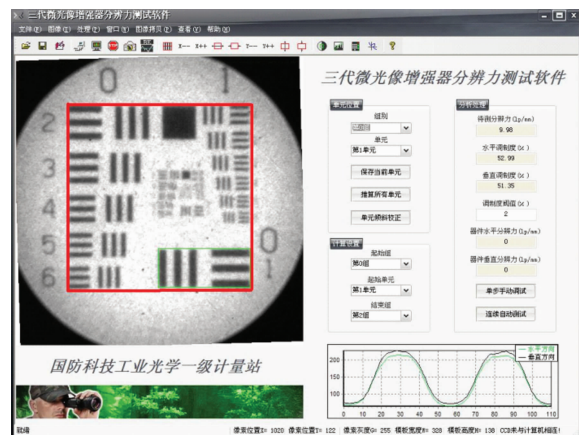


图 2 分辨力客观评价方法软件界面

Fig. 2 Software interface of resolution objectively evaluation method

根据上述靶标参数关系,在 ROI 区域内选定一个可清晰分辨的靶标单元(图 2 中的小框),以其大小作为此单元的标准模板的大小,软件生成与此靶标单元对应的一个二维矩阵,其中对应于黑色靶线的矩阵区域值为 0,其它矩阵区域值为 255。通过 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 的递推比,软件自动生成其它靶

标单元的标准模版。

(4)计算归一化互相关系数

将生成的分辨力单元的标准模板置于待测图像的 ROI 区域左上角,并按照逐行逐像素的方式移动该标准模板,每移动一次,利用归一化互相关公式计算当前标准模板与子图的归一化互相关系数。通过扫描匹配,可以求得相关系数的最大值及其子图的位置,实现对分辨力单元的定位。通过实验统计数据,可以获得可分辨靶线单元所对应的互相关系数的可分辨阈值,以此作为客观测试的判据。

(5)计算光学调制度

以扫描匹配中相关系数最大的子图位置作为光学调制度计算的位置。软件分别将水平和垂直靶线的灰度值逐列或逐行累加、平均,可以获得分辨力单元的水平靶线和垂直靶线的调制度曲线(图 2 中显示的曲线)。由于 CCD 摄像机具有较高的线性动态范围,在其线性动态范围内,像元的灰度值与照射在该像元的光强成正比,因此式(1)又可以表示为:

$$G = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max} + G_{\min}}, \quad (3)$$

式中: G_{\max} 为调制度曲线的最大值, G_{\min} 为调制度曲线的最小值。通过实验统计数据,可以获得可分辨靶线单元所对应的调制度的可分辨阈值,以此作为客观测试的另一个判据。

光学调制度的大小很大程度上反映了图像的可分辨性,可以从整体上判断图像的清晰程度。不同靶线的清晰度和其灰度曲线的光学调制度成正比关系。同时,光学调制度的大小和人眼观测的图像清晰程度有较好的一致性,光学调制度越高,图像越清晰。

(6)定量计算待测件的分辨力

以实验统计确定的相关系数阈值和调制度阈值作为双重判据,软件在 ROI 图像区域中自动计算各个分辨力单元的互相关系数和光学调制度,可以对微光像增强器的分辨力进行客观测试,实现智能化、自动化的客观测量。

4 实验结果

根据上述的测量方法,构建了一套完整的测量系统。以法国 PHOTONIS 公司生产的超二代

微光像增强器(编号为 5634207)、北方夜视西安微光器件研究中心生产的三代微光像增强器(编号为 2006-102)及北方夜视有限公司生产的二代微光像增强器(编号为 132181)分辨力测量结果为例,首先采用传统方法即通过测量显微镜进行人眼观测,读出分辨力值,然后用 CCD 摄像机取代测量显微镜,利用本评价方法通过计算机进行分辨力自动测量,得到分辨力的计算值,测量结果如表 1~3 所示。

表 1 法国超二代微光像增强器分辨力自动测量结果
Tab.1 Resolution automatically measuring results of II generation LLL image intensifier made in France

分辨力靶组别 (i 组-j 单元)	分辨力/ (lp · mm ⁻¹)	匹配系数	调制度 (阈值 2%)/(%)
1-5	31.68	0.88	14.2
1-6	35.56	0.86	9.3
2-1	39.92	0.83	7.4
2-2	44.81	0.84	6.9
2-3	50.30	0.80	5.9
2-4	56.46	0.75	2.4
2-5	63.37	0.68	1.2
人眼观测结果	第 2 组第 4 单元(56.46 lp/mm)		
客观计算结果	第 2 组第 4 单元(56.46 lp/mm)		

表 2 北方夜视三代微光像增强器分辨力自动测量结果
Tab.2 Resolution automatically measuring results of III generation LLL image intensifier made by North Night Vision Technology CO. LTD

分辨力靶组别 (i 组-j 单元)	分辨力/ (lp · mm ⁻¹)	匹配系数	调制度 (阈值 2%)/(%)
1-3	25.15	0.84	10.6
1-4	28.23	0.85	8.2
1-5	31.68	0.79	5.7
1-6	35.56	0.71	2.9
2-1	39.92	0.68	1.9
人眼观测结果	第 1 组第 6 单元(35.56 lp/mm)		
客观计算结果	第 1 组第 6 单元(35.56 lp/mm)		

表 3 北方夜视二代微光像增强器分辨力自动测量结果

Tab. 1 Resolution automatically measuring results of II generation LLL image intensifier made by North Night Vision Technology Co., LTD

分辨力靶组别 (i 组-j 单元)	分辨力/ (lp · mm ⁻¹)	匹配系数	调制度 (阈值 2%)/(%)
1-3	25.15	0.87	9.6
1-4	28.23	0.86	7.1
1-5	31.68	0.82	5.9
1-6	35.56	0.75	2.4
2-1	39.92	0.70	1.3
人眼观测结果	第 2 组第 1 单元(39.92 lp/mm)		
客观计算结果	第 1 组第 6 单元(35.56 lp/mm)		

表 1 及表 2 结果表明微光像增强器分辨力人眼观测结果与 CCD 摄像机实验结果具有较好的一致性。当微光像增强器噪声较大时,由于客观测试软件中的判据阈值是通过实验统计得到的,而人眼的观察结果又具有主观性,所以人

眼观测的结果与客观测试的结果存在不一致的可能。如表 3 所示的人眼观测结果高于客观计算结果。

5 结 论

将光学调制度模型引入分辨力客观评价,建立了基于不同原理的归一化互相关模型和光学调制度模型相结合的双重算法模型,给出了分辨力的客观评价方法,解决了微光像增强器分辨力测量中的客观评价问题。该方法先利用归一化互相关模型中的模板匹配系数进行定位和初步评价,后利用光学调制度模型进一步进行定量分析,提高了本评价方法的客观性和准确性。实验结果表明,通过 CCD 采集图像进行处理计算得到的微光像增强器分辨力值与人眼观测结果具有较好的一致性。该评价方法不仅为微光像增强器的分辨力提供了准确可靠测量校准手段,也可推广至 CCD、ICCD、EMCCD 等可见光探测成像系统的分辨力客观评价,在计量检测领域具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 向世明,倪国强. 光电子成像器件原理[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

XIANG SH M, NI G Q. *The Principle of Photo-electronic Imaging Devices* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.

[2] 程耀进,向世明,师宏立. 三代微光像增强器分辨力计算理论模型[J]. 应用光学,2007(5):63-66.

CHENG Y J, XIANG SH M, SHI H L. Theoretical model for resolution calculation of third generation image intensifiers [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007(5):63-66. (in Chinese)

[3] 艾克聪. 微光夜视技术的进展和发展[J]. 应用光学,2006,27(4):303-307.

AI K C. The progress and development of night vision technology [J]. *Journal of Applied Optics*, 2006,27(4):303-307.

[4] ESTRERA J P. Low light level limiting resolution of various digital imaging and image intensified systems [J]. *SPIE*, 2009,7326:1-17.

[5] 刘正云,谭谦,苏建刚,等. 微光夜视仪分辨力客观

评价判据研究[J]. 兵工学报,2000,21(2):54-57.

LIU ZH Y, TAN Q, SU J G, *et al.*. Objective evaluation criterion for the resolution of low-light-level night vision system [J]. *Acta Armament Arll*, 2000,21(2):54-57. (in Chinese)

[6] 苏大图,沈海龙,等. 光学测量与像质鉴定[M]. 北京:北京工业学院出版社,1988.

SU D T, SHEN L H, *et al.*. *Optical Measurement and Identification of Image Quality* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998.

[7] 向世明. 双近贴聚焦微光像增强器分辨力理论极限问题研究[J]. 应用光学,1988,29(3):351-353.

XIANG SH M. Theoretical resolution limit of double-proximity focusing image intensifiers [J]. *Journal of Applied Optics*, 1988, 29(3): 351-353. (in Chinese)

[8] 刘正云,金伟其,黄艳俊,等. 微光分辨力测试图像计算机仿真研究[J]. 红外技术,2004(4):55-58.

LIU ZH Y, JIN W Q, HUANG Y J, *et al.*. Computer simulation of resolution bars image in the measurement of low light level image system [J]. *Infrared Technology*, 2004(4):55-58. (in Chinese)

- [9] 党丽苹,戴炳明,唐树刚. 光学系统分辨率自动检测的研究[J]. 光子学报,1995(3):278-281.
DANG L P, DAI B M, TANG SH G. Research on the auto-detecting resolution of optical system[J]. 1995(3):278-281. (in Chinese)
- [10] GLYNN E F. USAF 1951 and microcopy resolution test charts and pixel profiles [J]. *Photonics Spectra*, 1999;183-189.
- [11] CHRZANOWSKI K. Testing of military optoelectronic system [J]. *Opto-Electronics Review*, 2001, 9(4):377-384.
- [12] BRIAN A, KEITH A N, GARTH J W, *et al.*. Keyhole coherent diffractive imaging [J]. *Natural physics*, 2008;1-5.
- [13] GONCALVES D P, GRIFFITH D J. Estimating uncertainty in resolution tests [J]. *Optical Engineering*, 2006,45(5),1-6.
- [14] 何斌,马天予,等. Visual C++数字图像[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.
HE B, MA T Y, *et al.*. *The Visual C++ Digital Image* [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2004.

作者简介:



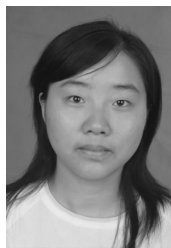
史继芳(1964—),女,河南鲁山人,硕士,研究员,1986年、2004年于南京理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微光夜视计量技术研究。E-mail: shijifangyeah@126.com



杨斌(1969—),湖北武汉人,高级工程师,1991年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事光电测试技术研究和软件开发工作,在信号分析与处理、机器视觉、模拟与仿真、网络数据库、分布式测量等领域具有较为丰富的工程经验。E-mail: yangbin7871@yahoo.com.cn



韩占锁(1981—)河北石家庄人,硕士,工程师,2005年、2008年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电测试技术研究和软件开发方面的研究。E-mail: zqbxhdzw@yahoo.cn



解琪(1984—),女,陕西西安人,硕士,工程师,2006年于长春理工大学获得学士学位,2009年于西安应用光学研究所获得硕士学位,主要从事微光计量技术方面的研究。E-mail: xieqixi_e@163.com



孙宇楠(1979—),女,山东栖霞人,工程师,2002年于西安工业大学获得学士学位,主要从事微光夜视计量技术方面的研究。E-mail: sylina_2009@126.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)