

基于最小可分辨对比度的 CCD 成像系统 最佳角放大率研究

王吉晖 金伟其 王岭雪 何玉青 王霞

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 光电成像系统存在一个最佳角放大率,使人眼与成像系统达到最佳匹配状态,系统获得最佳性能。基于 MRC 物理意义,提出 MRC 信道宽度 CCD 成像系统综合性能评价方法,通过实际 CCD 成像系统的观察实验确定了评价模型的表达式,分析了各种系统参数变化对该方法的影响。结果表明,利用 MRC 信道宽度评价方法描述的最佳角放大率变化与实际情况一致。在最佳角放大率情况下,系统与人眼视觉得到最佳匹配。

关键词 光电成像系统;最优化;最小可分辨对比度(MRC)信道宽度;角放大率

中图分类号 TN211; TZ219

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082811.2125

Optimal Angle Magnification for CCD Imaging Systems Based on Minimum Resolvable Contrast

Wang Jihui Jin Weiqi Wang Lingxue He Yuqing Wang Xia

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract There exists an optimal angle magnification to make the optoelectronic imaging system and human eye matching optimally, and under this condition the optoelectronic imaging system presents the optimal performance. A new evaluation method, minimum resolvable contrast (MRC) channel width, is proposed based on the physical meaning of MRC which can attain the optimal angle magnification for CCD imaging systems. The expression of MRC channel width is built through viewing experiments of CCD imaging systems. The impact of the change of several system parameters on MRC channel width is also analyzed. Results show that the optimal angle magnification attained from MRC channel width has good consistency with practical application.

Key words optoelectronic imaging systems; optimization; minimum resolvable contrast (MRC) channel width; angle magnification

1 引 言

光电成像系统一般由光学系统、探测器组件、电路处理组件、显示器(+目镜)组件等构成和人眼组成一个成像综合系统。不仅各组件/子系统性能影响光电成像系统的性能,而且人眼和光电成像系统的匹配状态也直接影响综合系统的最终观察效果。因此,对光电成像系统的评价应考虑人眼的特性。

对于人眼视觉与光电成像系统的匹配,已有一些研究思想和评价方法^[1~10]。如 2005 年,美国 NVESD (Night vision and electronic sensors directorate)提出的 NVThermIP 模型^[4]基于人眼对比度阈值传递函数,构造 TTP (Targeting task performance)标准代替 Johnson 准则,在战场仿真预测中令人满意。Zhou Yan 等提出了基于传递函

收稿日期: 2007-12-20; **收到修改稿日期:** 2008-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(60477036)和总装预研基金(9140A21010106BQ0120)资助项目。

作者简介: 王吉晖(1975—),女,博士研究生,主要从事光电成像系统性能评价及光电检测技术方向的研究。

Email: wjzhaojie@bit.edu.cn

导师简介: 金伟其(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事微光与红外成像技术、光电图像处理、光电检测技术方面的研究。Email: jinwq@bit.edu.cn

数信道宽度的评价方法^[7],研究了光电成像系统的性能与系统角放大率的关系;2007年,作者提出了一种基于最小可分辨温差(MRTD, minimum resolvable temperature difference)信道宽度的热成像系统性能评价方法^[8],分析了热成像系统的最佳角放大率,得到了比基于传递函数信道宽度方法更接近实际的结果,表明对于低照度/低信噪比光电成像系统性能的评价应采用基于信噪比的方法^[9]。

最小可分辨对比度(MRC, minimum resolvable contrast)是一种综合了系统信噪比、光子噪声和光学传递特性以及人眼视觉特性等因素,能够定量描述光电成像系统阈值对比度的评价参量^[11],已被用于光电成像系统的性能评价。鉴于MRC与MRTD在数理模型上的相似性,在文献[8, 9]的基础上,作者提出了一种基于MRC信道宽度的CCD成像系统性能评价方法^[10]。本文将根据MRC与MRTD在物理上的不同点,研究另一种基于MRC信道宽度的CCD成像系统性能评价方法。

2 光电成像系统的传递函数

2.1 系统角放大率

图1为光电成像系统的成像模式示意图,系统的角放大率 Γ 可表为

$$\Gamma = \frac{\tan \frac{\omega_o}{2}}{\tan \frac{\omega_i}{2}} = \begin{cases} -\beta f_o / f_e & (\text{viewing by eyepiece}) \\ -\beta f_o / R & (\text{viewing by display}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, ω_i, ω_o 分别为物方和像方视场角; f_o 为物镜焦距; β 为探测器到显示器的横向放大率; f_e 为直视型光电成像系统中的目镜焦距; R 为电视型光电成像中人眼距离显示器(电视机)的观察距离,对于确定的显示屏,改变 R 相当于改变综合系统的角放大率。

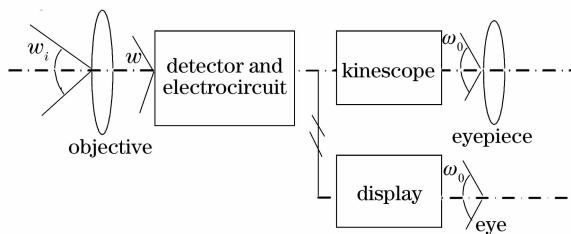


图1 光电成像系统成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optoelectronic imaging systems

2.2 光电成像系统的传递函数

光电成像系统与人眼视觉系统构成的综合系统传递函数 $MTF_h(f)$ 为

$$MTF_h(f) = MTF_s(f) \cdot MTF_{eye}(f) \quad (2)$$

$$MTF_s(f) = \prod_{i=1}^N MTF_i(f) = MTF_o(f) \cdot MTF_d(f) \cdot MTF_e(f) \cdot MTF_m(f) \quad (3)$$

其中, $MTF_{eye}(f)$ 为人眼的传递函数,采用文献[7]的带通传递函数模型; $MTF_s(f)$ 为光电成像系统的传递函数,主要包括光学系统传递函数 $MTF_o(f)$,探测器传递函数 $MTF_d(f)$,电子线路传递函数 $MTF_e(f)$,显示器传递函数 $MTF_m(f)$ 。

3 CCD成像系统综合性能评价方法

3.1 MRC模型定义

MRC定义为具有不同空间频率,高宽比为5:1的三条带目标图案处于均匀的背景中,在确定的空间频率 f 下,观察者恰好能分辨(50%概率)出条带图案时,目标与背景之间的对比度称为该空间频率 f 和平均亮度 L 背景下的最小可分辨对比度 $MRC(f, L)$ ^[11]。以水平扫描方向计算MRC的表达式为

$$MRC = \frac{SNR_{th} \sqrt{2N_{av} + N_{ccd}} \sqrt{N_x(x)N_y(y)}}{2N_{av} \sqrt{t_e} p_x(x) p_y(y)} \quad (4)$$

3.2 基于MRC信道宽度的“最佳”CCD成像系统性能评价

由于MRC和MRTD在数理上的相似性,根据文献[8],已提出了一种基于MRC信道宽度的CCD加入眼综合成像系统的性能评价方法^[10],评价参数 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 定义为

$$\eta_{MRC}(\Gamma) = \frac{\int_0^{f_m} \left[\frac{1}{MRC(f)} \right]^2 df}{\int_0^{f_m} \left[\frac{1}{MRC_o(f)} \right]^2 df}, \quad (5)$$

式中, f_m 为对比度 $MRC(f) = 1$ 时所对应的频率; $MRC_o(f)$ 为归一化参数。按照这一评价方法,可对最佳观察距离以及探测器几何参量、光学系统等参数的影响进行分析,获得与实测基本一致的结果。

典型的光电成像系统 $MRC(f)$ 曲线如图2所示, MRC 的数值越小,系统性能越高。与热成像系统 $MRTD(f)$ 以 $f = f_o = 1/\alpha$ (α 为探测器单元张角)为渐近线趋向无穷不同,对于CCD成像系统, $MRC(f)$ 存在物理极限,即 $MRC(f) \leq 1$,因此,在 $MRC(f)$ 曲线和 $MRC(f) = 1$ 之间存在一个有限的面积,其面积越大,表明 $MRC(f)$ 曲线越低,系统综合性能越高。因此,提出一种新的基于MRC信道宽度的综合性能评价参数 $\eta_{MRC}(\Gamma)$

$$\eta_{MRC}(\Gamma) = \int_0^{f_m} [1 - MRC(f)]^q df, \quad (6)$$

其中, q 为待定的常数。

模拟计算表明, q 为正数时, $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 均呈单峰函数, 存在一个最佳角放大率 Γ , 使 $\eta_{MRC}(\Gamma) \rightarrow \max$, 即系统综合性能最佳。采用实验和计算机模拟相结合的方法确定模型中 q 的取值。

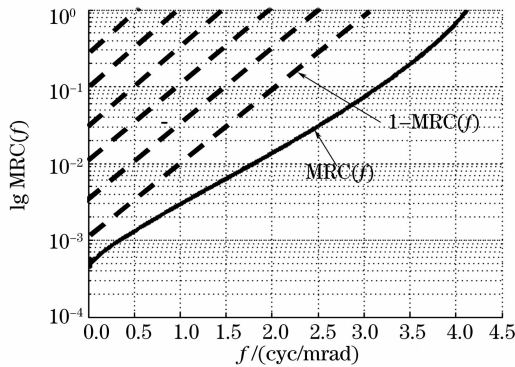


图 2 CCD 成像系统的 $MRC(f)$ 曲线
Fig. 2 $MRC(f)$ of a CCD imaging system

3.2.1 实验仪器

采用 03K9H-EX 1/3" 黑白高解析低照度 CCD 成像组件, 探测器单元 795×596 , 物镜焦距 $f_0 = 50$ mm, 最低工作照度 0.01 Lux; 采用的黑白视频监视器对角线尺寸为 22.7 cm, 高宽比 3:4, 水平分辨率 800 TVL。通过理论模型和实际狭缝测量, 获得的系统 MTF 如图 3 所示, 可以看出, 两者具有较好的一致性, 高频部分的偏差应是离散探测器欠采样引起的频率混叠效果。因此, 在后面的模拟中将以 MTF 的理论模型作为计算的依据。

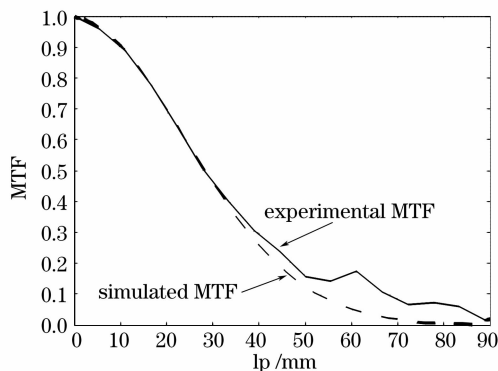


图 3 CCD 成像系统 MTF
Fig. 3 MTF curve of a CCD imaging system

3.2.2 实验原理与方法

根据(1)式, CCD 成像系统的角放大率为

$$\Gamma = -\beta \cdot \frac{f_0}{R} = \frac{f_0 H}{R h} = \frac{3}{5} \frac{f_0}{kh}$$

$$= 8.3/k \approx \begin{cases} 8.30 & k = 1.00 \\ 4.15 & k = 2.00, \\ 2.85 & k = 2.92 \end{cases} \quad (7)$$

式中, H 为显示器高度, h 为 CCD 探测器阵列高度 (3.6 mm), k 为观察距离 R 相对显示器对角线尺寸 L 的倍数。

观察者通过监视器观察 CCD 对不同场景的成像, 变化不同的观察距离确定最佳观察距离 R_m , 由式(7) 计算最佳观察距离对应的 Γ_m 。

3.2.3 实验结果及其分析

选择了 10 个视力正常或矫正正常的实验观察者, 按照实验方法进行一系列场景的观察, 观察者正常观察实验场景图像最远、最近和适察的距离为 R_f, R_n 和 R_m 。表 1 给出观察图 4 两幅视频场景图像的结果, 表中 $R_a = (R_f + R_n)/2$ 为平均观察距离; $k_1 = R_a/L, k_2 = R_m/L, \bar{k}_1, \bar{k}_2$ 分别为 k_1, k_2 的平均值。

表 1 系统观察实验的 R_m 与 k 结果

Tab. 1 Values of R_m and k in viewing experiments

Experiment 1: 2006-12-21 pm 4:55						
Observers	R_n /cm	R_f /cm	R_m /cm	R_a /cm	k_1	k_2
1	34.00	78.00	52.00	56.00	2.47	2.29
2	29.00	85.00	66.00	57.00	2.51	2.91
3	32.00	127.00	93.00	79.50	3.50	4.10
4	33.00	206.00	58.00	119.50	5.26	2.56
5	32.00	105.00	52.00	68.50	3.02	2.29
6	27.00	90.00	60.00	58.50	2.58	2.64
7	36.00	127.00	85.00	81.50	3.20	3.74
8	56.00	93.80	77.00	74.90	3.30	3.39
9	27.00	91.00	58.00	59.00	2.60	2.56
10	38.00	84.60	55.00	62.00	2.70	2.42
	\bar{k}_1	3.11	\bar{k}_2	2.89	\bar{k}_{1a}	2.88
Experiment 2: 2006-12-21 pm 5:25						
Observers	R_n /cm	R_f /cm	R_m /cm	R_a /cm	k_1	k_2
1	55.00	119.00	80.00	87.00	3.83	3.52
2	35.00	96.00	62.00	65.50	2.89	2.73
3	34.00	103.00	83.00	68.50	3.02	3.66
4	50.00	76.00	65.00	63.00	2.78	2.86
5	67.00	94.00	48.00	80.50	3.55	2.11
6	36.00	135.00	85.35	85.50	3.77	3.76
7	27.00	92.00	53.00	59.50	2.62	2.33
8	29.00	72.00	70.60	50.50	2.22	3.11
9	46.00	88.00	59.00	67.00	2.95	2.60
10	46.00	92.00	63.00	69.00	3.04	2.78
	\bar{k}_1	3.07	\bar{k}_2	2.95		

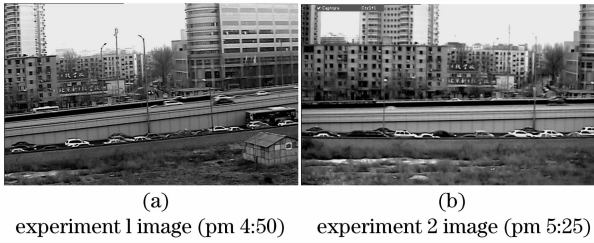


图 4 观察实验的场景视频图像
Fig. 4 Video images of viewing experiments

对表 1 的实验数据进行置信度分析,当置信限取值为 $\pm 2\sigma$,实验 1 第 4 组中的 R_f 出现明显偏差,使 $k_1 = 5.26$ 偏离在 2σ 以外,因此,按照肖维涅判据^[12]剔除实验 1 中该值后重新计算的 k_1 平均值 $\bar{k}_{1a} = 2.88$ 。实验表明,最佳观察距离 k_2 值平均值 \bar{k}_2 约为 $2.89 \sim 2.95$,平均观察距离 k_1 值的平均值 \bar{k}_1 约为 $2.88 \sim 3.07$ 。因此,本文取 $k_m = 2.92$,由式(7)得最佳放大率 $\Gamma_m \approx 2.85$ 。

取不同的 q 值,按照式(6)计算 CCD 综合成像系统匹配效率 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 曲线(如图 5),可以得到对应 $q = 2$ 的 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 曲线最佳匹配峰值点对应实验最佳放大率 Γ_m ,因此,可确定常数 q 值为 2。

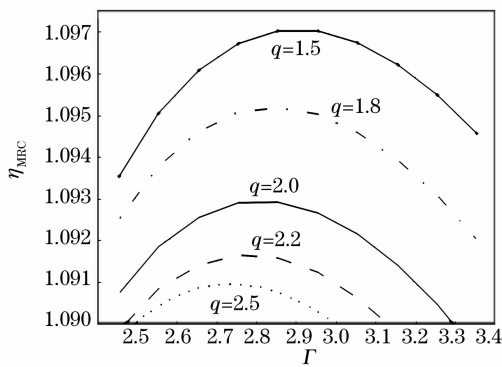


图 5 不同 q 值的 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 曲线
Fig. 5 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ with different value of q

4 分析与讨论

为考核基于本文 MRC 信道宽度评价方法的有效性和适应性,需要对(6)式做进一步的分析和讨论。 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 是系统性能参数和系统角放大率 Γ 的函数,影响 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 的主要 CCD 成像系统参量有 CCD 探测器、光学系统、电路,主要的人眼视觉参量有显示器亮度、人眼视力等,本文选择探测器尺寸、光学焦距、显示器亮度和人眼视力 4 个参数对 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 进行分析。

4.1 成像系统参数变化的影响

4.1.1 CCD 探测器尺寸

在其它参数相同条件下,选择 1/2" 和 1/3" CCD 探测器,分析其对 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 的影响。

图 6 给出了探测器尺寸变化时评价参数 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 的变化曲线,可以看出: $\Gamma_{m1/2} \approx 2.50, \Gamma_{m1/3} \approx 2.85$,对应的 $k_{1/2} \approx 2.50$ 和 $k_{1/3} \approx 2.92$,即 Γ_m 和 k 都随探测器尺寸减小而变大,但 k 总体上变化不明显,与文献[9]结论一致。

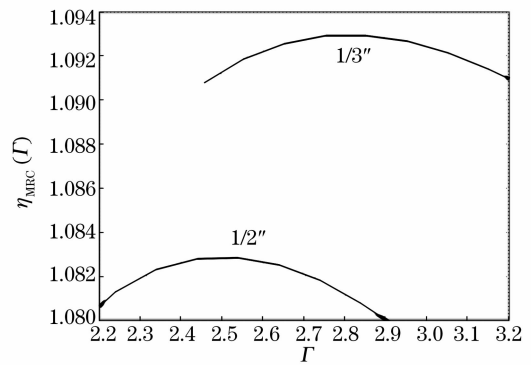


图 6 CCD 尺寸对 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 的影响
Fig. 6 Effect of different CCD dimensions on η_{MRC}

4.1.2 光学系统焦距

图 7 给出在保持光学系统 F 值不变的情况下不同焦距的 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 曲线。表 2 为对应的 Γ_m 和 k 值。 k 值基本保持不变,说明对于固定的光电成像系统只单纯改变光学系统焦距,对观察者观察显示屏的最佳距离影响不大,与实际的使用情况一致。

表 2 几种焦距对应的 Γ_m 和 k 值
Table 2 Values of Γ_m and k with the different focal lengths

f'_0 / mm	50	75	100	150
Γ_m	2.85	4.20	5.50	7.86
k	2.92	2.97	3.03	3.18

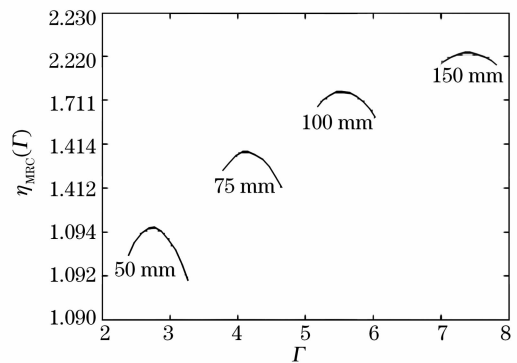


图 7 光学系统焦距对 $\eta_{MRC}(\Gamma)$ 的影响
Fig. 7 Effect of different focal lengths of optical system on η_{MRC}

4.2 人眼特征参数变化的影响

人眼特征参数对综合性能评价参数 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 的影响主要是显示器亮度和人眼视力。

4.2.1 亮度的变化对匹配效率的影响

图 8 给出在不同显示屏(平均)亮度条件下的综合性能评价参数 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 曲线,表 3 给出随亮度变化 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 预测的 Γ_m 和 k 的取值。可以看出,随着亮度的增加, $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 逐步增大, Γ_m 逐步减小并趋于定值,即当亮度趋向某一值后,继续增大亮度对观察距离的影响已不大,这与实际使用情况是一致的。

表 3 随着亮度的变化 Γ_m 和 k 值

$L / (\text{cd}/\text{m}^2)$	10	15	50	100	120	140	160
Γ_m	2.85	2.80	2.20	2.10	2.00	1.9	1.9
k	2.92	2.96	3.77	3.95	4.15	4.37	4.37

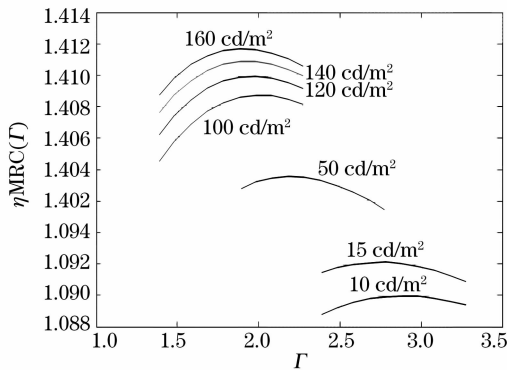


图 8 亮度变化对 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 的影响

Fig. 8 Effect of different luminances on η_{MRC}

4.2.2 人眼视力的影响

人眼视力是通过人眼响应等效线扩展函数的标准偏差 σ_e 来反映。正常视力的 σ_e 取值约为 0.2~0.3 mrad。我们取 $\sigma_e = 0.30$ mrad 对应标准人眼, $\sigma_e = 0.50$ mrad 对应非标准人眼(如近视眼等)。图 9 给出基于 MRC 信道宽度方法 σ_e 变化时的 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 曲线。可以看出,随着视力的恶化,不仅综合性能评价参数 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 下降,而且最佳角放大率也相应增大,即需要更近的观察距离,这与文献[13]结论也是一致的。

5 结 论

提出了一种新的基于 MRC 信道宽度的 CCD 成像系统综合性能评价方法,综合评价参数 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 不仅可评价 CCD 成像系统与人眼视觉的匹配状态,而且可定量地确定 CCD 成像系统的最佳性能和角放大率的关系。通过对 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 随系统参

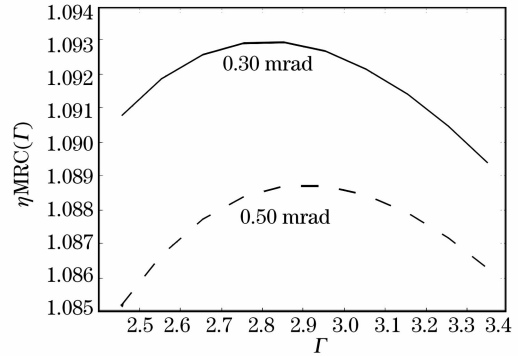


图 9 人眼标准偏差对 $\eta_{\text{MRC}}(\Gamma)$ 的影响

Fig. 9 Effect of different standard deviations of human eye on η_{MRC}

数变化的分析对比表明,该综合性能评价方法能够对系统最佳角放大率和最佳统性能给出正确的评价,并与实际系统有很好的 consistency。

基于 MRC 信道宽度的 CCD 成像系统性能评价方法已能够定量地确定系统的最佳匹配状态,利用 MRC 及其最佳匹配条件进行 CCD 成像系统的优化设计,将有望获得更佳的成像系统。

参 考 文 献

- 1 J. M. Lloyd. Thermal Imaging System [M]. Yi Yibai, Dai Chuanheng transl. Beijing: National Defence Industry Press, 1981, 112~120(in Chinese)
- 2 劳埃德. 热成像系统[M]. 尹白云, 戴传衡译. 北京: 国防工业出版社, 1981, 112~120
- 3 A. V. Meeteren. Prediction of realistic visual tasks image quality data[C]. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. Proc. SPIE*, 1977, **30**: 150~161
- 4 P. G. J. Barten. Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(10): 2024~2031
- 5 Ronald G. Driggers, Eddie L. Jacobs, Richard H. Vollmerhouse et al.. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming[J]. *Proc. SPIE*, 2006, **6207**: 620709. 1~620709. 17
- 6 Zhao Shunlong, Wang Zhaoqi. Optical assessment of a project lens design for head-mounted project display in visual space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 730~735(in Chinese)
- 7 赵顺龙, 王肇圻. 投影式头盔物镜设计在视空间的性能评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 730~735
- 8 He Guojing, Zhang Jianqi, Wang Xiaorui et al.. An object discrimination model for triangle orientation discrimination threshold measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 438~442(in Chinese)
- 9 何国经, 张建奇, 王晓蕊等. 用于三角方向鉴别测量的客观判别模型[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 438~442
- 10 Zhou Yan, Jin Weiqi, Liu Guangrong. Evaluation of electro-optical system with channel with method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 212~215
- 11 Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Xia et al.. Performance evaluation research for IR imaging system based on the MRTD channel width theory[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4): 256~260(in Chinese)

- 王吉晖, 金伟其, 王霞等. 基于 MRTD 信道宽度的热成像系统最佳角放大率的研究性能评价[J]. 红外与毫米波学报, 2007, **26**(4): 256~260
- 9 Wang Jihui, Jin Weiqi, Wang Lingxue. Comparison of general performance evaluation methods for thermal imaging systems based on channel width of minimum resolvable temperature difference and modulating transfer function[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(10): 905~910 (in Chinese)
- 王吉晖, 金伟其, 王岭雪. 基于 MRTD 和 MTF 的热成像系统综合性能评价方法的对比[J]. 北京理工大学学报, 2007, **27**(10): 905~910
- 10 Wang Jihui, Jin Weiqi, He Yuqing *et al.*. Performance evaluation of CCD imaging systems with the square integral method based on MRC[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6621**: 66210S
- 11 Gordon Arthur. Prediction and measurement of minimum resolvable contrast for TV sensors [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2223**: 533~542
- 12 Liao Yulin, Yi Kunnan. Probability and Statistic[M]. Shanghai: Fudan Press, 1995, 215~224 (in Chinese)
- 廖玉麟, 易昆南. 概率论与数理统计[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995, 215~224
- 13 Jin Weiqi, Gao Zhiyun. Optimal angle magnification for thermal imaging system[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, **17**(5): 558~563 (in Chinese)
- 金伟其, 高稚允. 热成像系统最佳角放大率的研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, **17**(5): 558~563



更 正

《光学学报》2008 年 28 卷 9 期刊登文章《西洋参和高丽白参的 X 射线显微鉴定研究》, 作者 薛艳玲, 肖体乔, 刘丽想, 胡 雯, 徐洪杰, 页码 1828~2832, 经核实有如下错误需要修改。

第一单位应为: 中国科学院上海应用物理研究所,
特此声明更改。

《光学学报》编辑部

2008-10-28