

文章编号:1001-9014(2007)04-0256-05

基于 MRTD 信道宽度的热成像系统 性能评价理论研究

王吉晖, 金伟其, 王霞, 王岭雪

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要:热成像系统与人眼之间存在最佳匹配问题, 存在一个最佳的角放大率使人眼与成像系统达到最佳的匹配状态, 使系统性能达到最佳. 本文提出一种基于信噪比模型的热成像系统性能评价方法, 导出了一个基于 MRTD 信道宽度的热成像系统评价参量. 通过对实际热成像系统的观察实验和分析比较, 表明使用这个评价参量, 可以获得热成像系统的最佳角放大率或最佳观察距离, 使系统与人眼视觉得到最佳的匹配状态. 结果对于进一步发展光电成像系统的性能评价理论具有理论意义, 而且可望对实际系统的设计提供理论指导.

关键词:热成像系统; 最优化; 最小可分辨温差 MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference); 角放大率; 观察距离

中图分类号: TN211; TN219 **文献标识码:** A

PERFORMANCE EVALUATION OF THERMAL IMAGING SYSTEMS BASED ON MRTD CHANNEL WIDTH

WANG Ji-Hui, JIN Wei-Qi, WANG Xia, WANG Ling-Xue

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

Abstract: It is well known that there exists an optimal angle magnification which can make the thermal imaging systems and human eye matching optimally, thus, the thermal imaging systems attain the optimal performance. A new optimal performance evaluation method was proposed to find the optimal angle magnification on the basis of SNR model. Based on MRTD channel width, a new evaluation parameter was presented for thermal imaging systems performance testing and evaluating. The optimal angle magnification or the optimal viewing distance can be acquired by using the new evaluation parameter through the experimental analysis for the thermal image systems. The new theory is of great significance for developing the evaluation theory of photoelectronic imaging systems, and it provides potential theory guidance for the design of practice systems.

Key words: thermal imaging systems; optimization; MRTD; angle magnification; viewing distance

引言

在目视型光电成像系统中, 人眼是一个关键组成部分, 传统的性能评价模型^[1]未能充分考虑人眼视觉的影响, 因此, 其结果难以解释或评价实际应用中的一些问题^[2]. 实际应用表明: 光电成像系统与人眼之间存在最佳匹配问题, 存在最佳角放大率使人眼与 OEO 组件(光电成像系统结构为光学(电子(光学, 简称 OEO 组件)达到最佳的匹配状态^[2], 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问题, 国内外已提

出一些研究思想和评价方法. J. M. Lloyd 讨论了热成像系统最佳角放大率^[3]; Meeteren^[4]研究了视觉阈值特性; Barten 研究提出了平方根积分评价法^[5], 并分析了与主观评价的一致性^[6]; 1994 年 D. Lyons 研究了包含观察者的显示器响应特性对 TIS 性能模型^[7]的影响. 国内郝康心提出了综合评价方法^[8], 艾克聪^[9]分析了以往微光图像探测的研究方法和成果, 提出了综合研究微光成像系统性能的观点; 迟学芬等研究了基于信息理论的采样成像系统匹配设计方法^[10]; 金伟其、周燕等研究提出了光电成像系统性能的信道宽度评价方法^[11,12], 研究了光电成像

收稿日期: 2006-09-20, 修回日期: 2007-01-10

Received date: 2006-09-20, revised date: 2007-01-10

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, 吉林梨树人, 北京理工大学信息科学技术学院光电工程系博士研究生, 主要研究方向: 光电成像系统性能评价及光电检测技术.

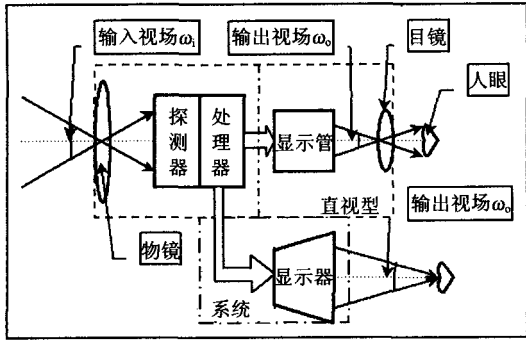


图 1 直视型和电视型成像系统的成像关系
Fig. 1 Imaging relation of viewing directly imaging system and TV imaging system

系统的最佳角放大率和最佳观察距离,分析结果与实际情况有比较好的一致性。

在光电成像系统信道宽度评价方法^[11,12]中,采用了 MTF 信道宽度,但对于诸如热成像系统的低信噪比光电成像系统,其性能不仅受限于系统的传递特性,而且还受限于系统的信噪比。因此,本文将从基于信噪比的热成像系统最小可分辨温差 MRTD 出发,研究新的热成像系统性能评价理论,探讨热成像系统最佳角放大率和最佳观察距离等问题。

1 热成像系统的传递函数

1.1 系统角放大率

图 1 为直视型和电视型光电成像系统的示意图,系统的角放大率 Γ 可表为

$$\Gamma = \begin{cases} -\beta \cdot f_0 / f_e & (\text{直视型}) \\ -\beta \cdot f_0 / R & (\text{电视型}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, f_0 为物镜焦距; β 为探测器到显示器(即光学 \Rightarrow 电子 \Rightarrow 光学,简称 OEO 组件)的横向放大率; f_e 为直视目镜焦距; R 为电视观察距离。

1.2 人眼传递函数

基于带通滤波器的人眼视觉模型为

$$MTF_{eye}(f) = M \frac{1}{K} \sqrt{\frac{T}{2}} \left[\left[\frac{1}{\eta_p P_l} + \frac{\Phi_0}{(1-F(f))^2} \right] \left[\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{X_e^2} + \left(\frac{f}{N_e} \right)^2 \right]^{-0.5} M_{opt}(f) \right], \quad (2)$$

式中具体参数的含义可参见文献[12]。

1.3 热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

$$MTF_H(f) = MTF_s(f) MTF_{eye}(f/\Gamma), \quad (3)$$

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

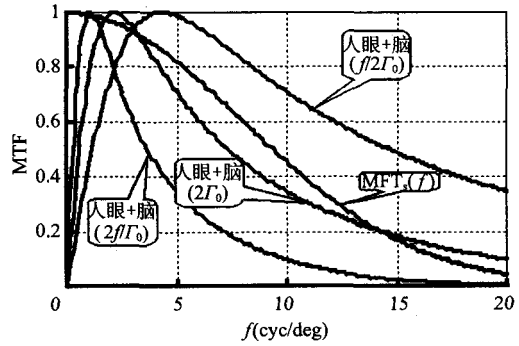


图 2 视觉系统和成像系统的匹配
Fig. 2 Matching of the human visual system and optoelectronic imaging system

$$\cdot MTF_e(f) \cdot MTF_m(f), \quad (4)$$

其中, $MTF_s(f)$ 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 $MTF_m(f)$ 等。

视觉系统与成像系统的匹配关系如图 2 所示。由于人眼视觉频率响应的带通性质,存在最佳角放大率 Γ_m ,使综合系统达到最佳匹配。

1.4 基于 MTF 信道宽度的光电成像系统性能评价方法^[12]

光电成像系统的信道宽度 N 为

$$N = \int_0^\infty MTF_s^2(f) df. \quad (5)$$

定义综合系统的信道宽度 N' 为

$$N' = \int_0^\infty MTF_H^2(f) = \int_0^\infty MTF_{eye}^2(f/\Gamma) \cdot MTF_s^2(f) df. \quad (6)$$

按照信道宽度评价理论^[12],光电成像系统与人眼视觉的匹配用匹配效率 η 表示

$$\eta = N'/N. \quad (7)$$

光电成像系统性能越好, $\eta \rightarrow \max$, 存在一个最佳角放大率 Γ_m 。

2 基于 MRTD 信道宽度的“最佳”热成像系统性能评价

2.1 MRTD 模型

最小可分辨温差 MRTD 是基于热成像系统信噪比得到的主要性能参量之一,是综合评价系统温度分辨力和空间分辨力的重要参数,不仅包括系统特性,也包括了观察者的主观因素。MRTD 简化模型为^[1]

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \frac{NETD \cdot SNR_{DT}}{MTF_H(f)} \cdot \left(\frac{\alpha\beta}{\tau_{df} \Delta f_n t_e} \right), \quad (8)$$

式中,具体参数的含义可参见文献[1]。

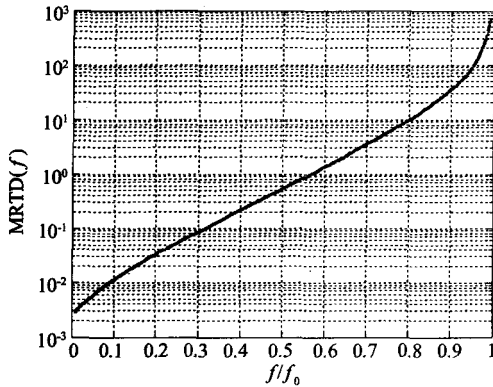


图3 热成像系统 MRTD(f) 曲线
Fig.3 The MRTD(f) curve of a thermal imaging system

图3是典型热成像系统的 MRTD(f) 曲线. 其以 $f=f_0=1/\alpha$ 为渐近线, 对于非光学衍射限系统, α 为探测器单元尺寸.

2.2 基于 MRTD 信道宽度的“最佳”热成像系统性能评价

MRTD 给出了热成像系统对于不同频率 7:1 四条目标图案的温度分辨特性, 数值越小性能越高, 即图3中曲线越低性能越好. 计算机模拟以及实际观察均表明: 随着系统角放大率 Γ 的变化, MRTD 曲线存在一定程度的上下移动变化, 即存在最佳的角放大率 Γ_m , 使 MRTD(f) 曲线下的面积最小. 考虑到实际景物热图像的低频和中频信息一般占据主要比例, 且 MRTD 随 f 逼近 f_0 的无穷趋势, 可采用 $1/\text{MRTD}(f)$ 的形式来突出中低频的影响.

参照 MTF 信道宽度评价理论的匹配效率定义式(7), 我们定义热成像系统 + 人眼系统综合系统基于 MRTD 信道宽度的匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 为

$$\rho(\Gamma) = \frac{1}{S_0} \int_0^{f_0} \left[\frac{1}{\text{MRTD}(f)} \right]^q df \quad (9)$$

式中, 指数 q 为常数; f_0 为热成像系统的截止频率; S_0 为与 Γ 无关的归一化参数, 这里采用以下定义

$$S_0 = \int_0^{f_0} \left[\frac{1}{\text{MRTD}_0(f)} \right]^q df \quad (10)$$

其中, $\text{MRTD}_0(f)$ 是不包含人眼环节的热成像系统 MRTD, 即式(8)中用 $\text{MTF}_s(f)$ 代替 $\text{MTF}_H(f)$ 的 MRTD 表达式.

模拟计算表明: 随着 q 在 $[1, 3]$ 之间取值, $\rho(\Gamma)$ 均呈单峰函数, 即存在一个最佳角放大率 Γ_m , 使 $\rho \rightarrow \max$. 为了确定模型中 q 的取值, 我们采用实验和计算机模拟结合的方法进行研究分析.

• 实验仪器

采用 M600 型非制冷焦平面热像仪, 探测器单

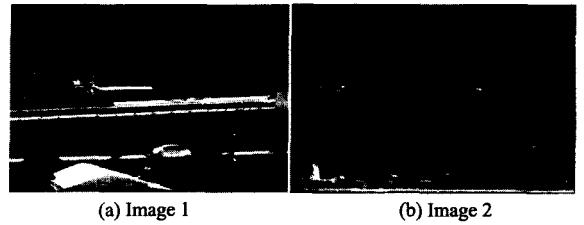


图4 观察实验的场景视频图像
Fig.4 The video images in the viewing experiments

元数 320×240 , 单元尺寸 $45 \mu\text{m} \times 45 \mu\text{m}$, 探测器阵列尺寸 $14.4 \text{mm} \times 10.8 \text{mm}$; 光学物镜焦距 $f'_0 = 50 \text{mm}$, $F=1$; 等效噪声温差 $\text{NETD} \leq 100 \text{mK}$; 模拟计算的 MRTD 曲线如图3所示.

采用黑白视频监视器, 对角线尺寸为 22.7cm , 高宽比 3:4, 水平分辨率 800TVL.

• 实验原理

根据式(1), 对于实验用热像仪, 在观察距离 R 处观察显示器上的热图像, 热成像系统的角放大率为

$$\Gamma = -\beta \cdot \frac{f'_0}{R} = \frac{f'_0 H}{R h} = \frac{3 f'_0}{5 kh} = 2.778/k$$

$$= \begin{cases} 2.778 & k = 1 \\ 1.389 & k = 2 \\ 1.111 & k = 2.5 \end{cases} \quad (11)$$

式中, H 为显示器的高度, h 为探测器阵列的高度 ($=10.8 \text{mm}$), 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热像仪对不同场景的成像, 观察者变化观察距离确定最佳观察距离 R_m 以及 k , 由式(9)计算不同 q 值下对应的最佳角放大率 Γ_m , 使其与式(11)对比, 确定模型应选择的 q 值.

• 实验结果及其分析

若观察者正常观察实验图像的最远、最近和适察距离分别为 R_f 、 R_n 和 R_m . 我们选择了 15 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.

表1和表2给出观察图4两幅视频场景图像的实验结果, 表中 $R_a = (R_f + R_n)/2$ 为平均观察距离; $k_1 = L/R_a$, $k_2 = L/R_m$. 可以看出: 虽然不同观察者对不同场景的观察距离有所波动, 但最佳观察距离的 k_2 值平均值 \bar{k}_2 约为 2.48, 平均观察距离的 k_1 值平均值 \bar{k}_1 约为 2.46~2.51. 因此, 下面取对应最佳观察距离的 $k_m = 2.5$, 由式(11)得到最佳放大率 $\Gamma_m \approx 1.11$.

同时按照式(9), 取不同的 q 值得到如图5所示的热像仪的匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线. 可以看出: 对应

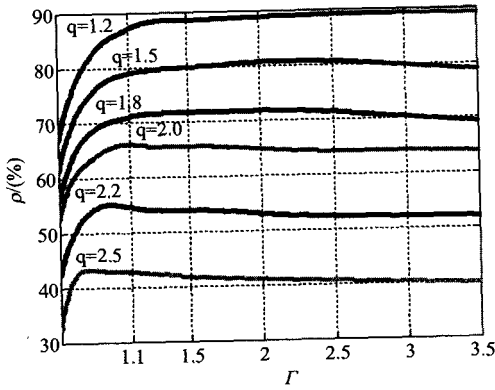


图5 基于 MRTD 信道宽度的匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线
Fig.5 The matching efficiency curve of $\rho(\Gamma)$ based on MRTD channel width

$q=2$ 的 $\rho(\Gamma)$ 曲线最佳匹配峰值点对应的最佳放大率 Γ_m 在 1.1 左右. 因此, 综合比较式(7)的模型, 可确定常数 q 值为 2.

2.3 基于 MRTD 信道宽度评价理论的适应性分析

为考核基于 MRTD 信道宽度评价理论的适应性, 对其它几种系统进行进一步的模拟计算分析.

A. 热成像系统 1

对同一非制冷焦平面热成像组件, 将光学系统改为 $f'_0 = 100\text{mm}$, 则对应 $q=2$ 的 Γ_m 约在 2.2 左右, 结合式(11)可推知: 在系统部件性能变化不大的情况下, 单纯改变系统的焦距并不影响最佳观察距离, 这与实际观察情况是一致的.

B. 热成像系统 2

基于长波制冷型 288×4 焦平面探测器的扫描型热成像系统, 探测器单元尺寸为 $25\mu\text{m} \times 28\mu\text{m}$,

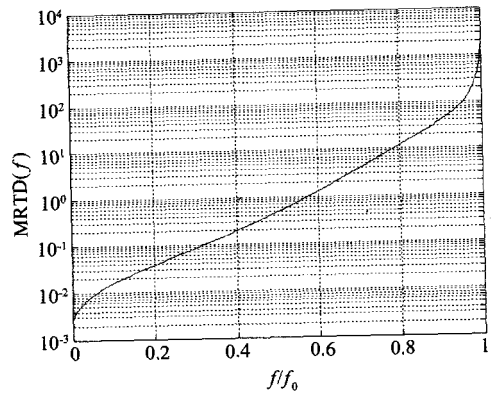


图6 扫描型热成像系统的 MRTD 曲线
Fig.6 The MRTD curve of the scanning thermal imaging system

光学系统焦距 $f'_0 = 205\text{mm}$, 模拟的系统 MRTD 曲线如图 6 所示.

按照本评价理论, 模拟得到的系统匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线如图 7, 其峰值点在 $\Gamma_m \approx 5.1$ 附近. 类似式(11), 由系统参量可得 $\Gamma = 15.25/k$, 即对应的最佳观察距离约为 $k \approx 3$ 倍显示器对角线. 这与实际观察效果是基本一致的.

C. 热成像系统 3

基于中波制冷焦平面探测器的凝视型热成像系统, 探测器规模 320×240 , 探测器单元尺寸 $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$, 光学系统焦距 $f'_0 = 100\text{mm}$, 模拟的系统 MRTD 曲线如图 8 所示.

同理, 模拟得到的系统匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线如图 9, 其峰值点在 $\Gamma_m \approx 5$ 附近, 由系统参量可得 $\Gamma = 10.0/k$, 即对应的最佳观察距离约为 $k \approx 2$ 倍显示器对角线. 这也与实际观察效果是基本一致的.

表1 图像 1 最佳观察距离与监视器对角线的倍数关系

Table 1 The multiple relation of the optimal observed distance and the monitor diagonal length for image 1

观察 Image1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	\bar{k}	σ_k
R_n	38.0	35.5	36.0	32.5	38.5	41.0	47.5	44.5	38.0	41.0	39.0	41.0	38.0	30.0	48.0		
R_f	83.0	49.0	76.0	57.5	56.5	81.0	76.0	66.0	79.5	76.5	75.5	84.0	67.0	83.5	72.0		
R_m	55.0	46.0	55.0	50.0	50.0	50.0	61.0	58.0	62.0	62.5	54.0	65.0	61.3	55.0	60.0		
R_a	60.5	42.2	56.0	45.0	47.8	61.0	61.7	55.2	58.7	58.8	57.2	62.5	52.5	56.7	60.0		
k_1	2.67	1.98	2.47	1.98	2.09	2.69	2.72	2.43	2.59	2.59	2.52	2.75	2.31	2.50	2.64	2.46	0.26
k_2	2.42	2.03	2.42	2.20	2.20	2.20	2.69	2.56	2.73	2.75	2.38	2.86	2.70	2.42	2.64	2.48	0.25

表2 图像 2 最佳观察距离与监视器对角线的倍数关系

Table 2 The multiple relation of the optimal observed distance and the monitor diagonal length for image 2

观察 Image1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	\bar{k}	σ_k
R_n	49.5	48.0	45.5	35.0	35.0	47.5	40.0	54.5	35.5	40.0	36.0	54.0	25.5	32.0	43.0		
R_f	69.0	72.0	85.0	72.0	65.0	63.0	89.0	98.0	61.5	60.0	86.0	77.0	70.0	62.5	77.0		
R_m	59.3	60.0	65.3	53.5	50.0	55.3	64.5	76.3	48.5	50.0	61.0	65.5	32.0	47.3	60.0		
R_a	60.0	46.0	50.0	45.0	46.5	50.0	61.0	58.0	62.0	62.5	54.0	65.0	61.3	63.7	60.0		
k_1	2.61	2.64	2.87	2.36	2.20	2.43	2.84	3.36	2.14	2.14	2.69	2.89	2.10	2.08	2.64	2.51	0.31
k_2	2.64	2.03	2.20	1.98	2.05	2.20	2.69	2.56	2.73	2.73	2.38	2.86	2.70	2.81	2.64	2.48	0.31

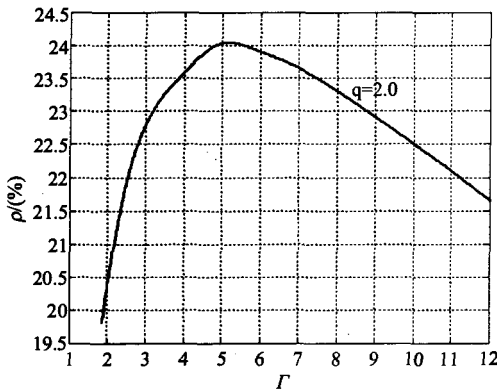


图7 当 $q=2$ 基于MRTD信道宽度的匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线
Fig.7 The matching efficiency cure of $\rho(\Gamma)$ based on MRTD channel width when $q=2$

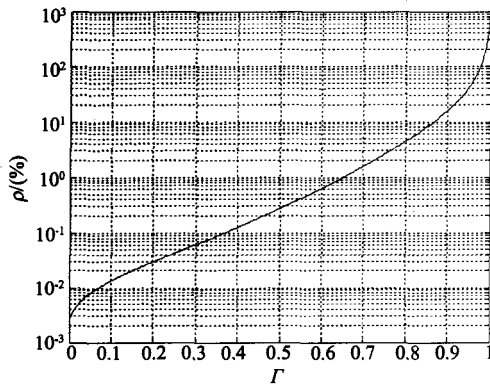


图8 凝视型热成像系统的MRTD曲线
Fig.8 The MRTD curve of the staring IR thermal imaging system

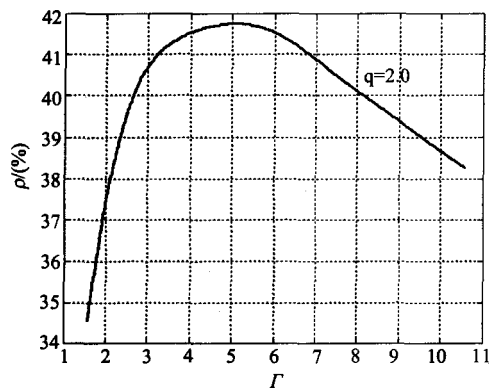


图9 当 $q=2$ 基于MRTD信道宽度的匹配效率 $\rho(\Gamma)$ 曲线
Fig.9 The matching efficiency cure of $\rho(\Gamma)$ based on MRTD channel width when $q=2$

3 结语

本文从基于信噪比的MRTD出发,研究了热成像系统性能的评价方法,提出了一种新的基于MRTD信道宽度匹配效率的评价理论,不仅可以评价热成像系统与人眼视觉的匹配状态,而且可定量地确定热成像系统的最佳放大率或最佳观察距离。

实验结果表明,根据该理论获得的最佳观察距离与实际热成像系统的观察情况基本一致。

在实际通过目镜观察的热成像系统性能测试评价中,外接显示器的观察效果往往好于实际通过目镜的观察效果,这已是界内人们早已关注的现象,传统评价理论难以有效说明,但利用本评价理论不仅可从匹配效率进行解释,而且可定量评价和计算,这对于热成像系统的优化设计具有重要的指导作用。利用本理论还可从一些新的角度评价和分析热成像系统性能,这将在后续论文中给出。

REFERENCES

- [1] ZHANG Jin-Xian, LI Yu-Dan, JIN Wei-Qi. *Low Light Level and Infrared Imaging Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术. 北京: 北京理工大学出版社), 1995: 240—242.
- [2] JIN Wei-Qi. Normalized space of parameters for performance analysis of thermal image systems [J]. *Infrared Technology* (金伟其. 热成像系统性能分析中的参量归一化空间. 红外技术), 1995, 17(1): 27—29.
- [3] Lloyd J M. *Thermal Imaging System* [M]. New York: Plenum Press (尹白云, 戴传衡译. 热成像系统. 北京: 国防工业出版社), 1981.
- [4] Meeteren A V. Prediction of realistic visual tasks image quality data [C]. *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1977, 21: 135—145.
- [5] Barten P G J. The SQRI method: a new method for the evaluation of visible resolution on a display [C]. *Proc. Soc. Inf. Displ.*, 1987, 28: 253—262.
- [6] Barten P G J. Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method [J]. *Opt. Soc. Am. A.*, 1990, 7(10): 2024—2031.
- [7] Lyons D. A performance model of TISs which includes the human observer's response to "State of the Art" displays [C]. *SPIE*, 1994, 2224: 130—141.
- [8] HAO Kang-Xin. Research on vision threshold and photoelectronic imaging developmetn [J]. *Journal of Applied Optics* (郝康心. 视觉阈值特性研究与光电成像技术进展. 应用光学), 1985, 2: 1—6.
- [9] AI Ke-Cong. Research on the threshold detecting theory and apparent distance selecting equation of LLI imaging system [J]. *Journal of Applied Optics* (艾克聪. 微光成像系统的阈值探测理论和视距探测方程的研究. 应用光学), 1994, 15(4): 21—28.
- [10] CHI Xue-Fen, HAN Chang-Yuan, YI Zhi-Dong. Matching design methods based on information theory in sampled imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica* (迟学芬, 韩昌元, 易志栋. 基于信息理论的采样成像系统匹配设计. 光学学报), 2003, 23(3): 278—283.
- [11] JIN Wei-Qi, Gao Zhi-Yun. Optimal angle magnification for thermal imaging system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology* (金伟其, 高稚允. 热成像系统最佳角放大率的研究. 北京理工大学学报), 1997, 17(5): 558—563.
- [12] ZHOU Yan, JIN Wei-Qi, LIU Guang-Rong. Evaluation of electro-optical system with channel with method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 212—215.