

基于光电成像系统最小可分辨对比度的 扩展源目标作用距离模型

金伟其 高绍姝* 王吉晖 王霞 李力 刘广荣

(北京理工大学光电工程系 光电成像与信息工程研究所, 北京 100081)

摘要 可见光/近红外光电成像系统的作用距离预测是实际系统总体设计的重要环节。为了使系统的预测及性能评价更准确,研究了光电成像系统对扩展源目标的作用距离预测方法,给出了最小可分辨对比度(MRC)的定义及其测量方法,提出了基于MRC的作用距离模型;通过结合实际系统分析,讨论了模型的计算过程及其特点。由于综合考虑了目标与背景特性、环境路径和大气特性、光电成像系统特性以及人眼视觉特性等因素,提出的作用距离预测方法较传统基于瞬时视场(IFOV)的极限分辨角方法更为合理科学,可有效地进行陆上、海上以及航空航天遥感等可见光/近红外光电成像系统的性能评价。

关键词 测量; 最小可分辨对比度; 光电成像系统; 作用距离

中图分类号 TP873 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20092906.1552

A Model to Predict Range Performance of Imaging System for Extended Target Based on Minimum Resolvable Contrast

Jin Weiqi Gao Shaoshu Wang Jihui Wang Xia Li Li Liu Guangrong

(*Institute of Optoelectronic Imaging and Information Engineering, Department of Optical Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract Prediction of operating range is an important part in designing the visible and near-infrared imaging system. To insure the reliability of the prediction and evaluation, the range prediction method of the optoelectronic imaging system adapted for extended target is studied in this paper. The definition and measurement of minimum resolvable contrast (MRC) is introduced. A mathematical model for range prediction based on MRC is established. The calculation procedure and characteristics of the model are discussed combining an actual system. Compared with the traditional way based on the smallest resolution angle of instantaneous field of view (IFOV), the range prediction model is more reasonable and scientific, because that factors such as characteristics of object and background, atmospheric and transmission path condition, performance of imaging system, human visual system are taken into account. It is an effective approach to evaluate the visible and near-infrared imaging system for onshore, offshore and remote sensing detection.

Key words measurement; minimum resolvable contrast; optoelectronic imaging system; range prediction

1 引 言

目前,以 CCD/CMOS 器件为成像传感器的可见光/近红外光电成像技术得到迅速的发展,其应用领域遍及军事、工业、农业、医学、航空航天、公安监控以及人们的日常生活。对于远距离观察、大视场监视等专门的应用场合,根据应用要求(视场、气象

与环境条件、目标与背景特性、作用距离等)要求进行系统总体设计是整个光电成像系统的首要任务,科学的设计方法对于合理的系统设计具有重要的指导作用。

然而,目前在诸多可见光光电成像系统的设计中,大多只是简单地采用离散探测器单元的空间张

收稿日期: 2008-10-23; 收到修改稿日期: 2008-11-25

基金项目: 十一五总装预研基金项目(9140A21010106BQ0120)资助课题。

作者简介: 金伟其(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事夜视与红外技术,光电图像处理,光电检测技术,光电仪器等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: gaoshaoshu@yahoo.cn

角-瞬时视场(IFOV)作为系统极限分辨角,进而根据 Johnson 准则进行系统作用距离的分析^[1,2],未考虑目标/背景特性、大气传输影响、光电成像系统的传递特性以及人眼视觉特性等,即使考虑到这些影响,也往往由于考虑不周全^[3],从而造成系统设计与实际观察效果的差异。

近年来,可见光光电成像系统性能评价理论取得了进展,其中最小可分辨对比度(MRC)^[4~7]是一种可定量描述可见光光电成像系统阈值对比度的评价参量,它综合了系统灵敏度和噪声、目标空间频率以及人眼视觉特性等因素,能更全面地反映光电成像系统的极限性能。MRC 与热成像系统最小可分辨温差(MRTD)类似,是可见光成像系统成像质量的主观和客观评价相结合的可测试性能参量,测量结果受人眼视觉特性和观察者心理因素的影响。

本文将从目标/背景特性、大气传输影响、光电成像系统的传递特性以及人眼视觉特性等因素出发,研究建立一种基于 MRC 的可见光光电成像系统作用距离模型。

2 光电成像系统的 MRC 性能评价参数

2.1 MRC 的定义

虽然 MRC^[6]与 MRTD 有一定的相似性,但由于热成像系统主要提取景物辐射差(温差)信号,即 MRTD 只需控制目标与背景之间的温差,而 MRC 往往还与背景(或景物平均)亮度相关。本文定义目标与背景的对比度 C 为

$$C = \frac{(L_t - L_b)}{(L_t + L_b)}, \quad (1)$$

式中 L_t 和 L_b 分别为目标和背景的亮度。

具有不同空间频率,高宽比为 5:1,亮度为 L_t 的 3 条带目标图案处于均匀亮度 L_b 的背景中,对于某

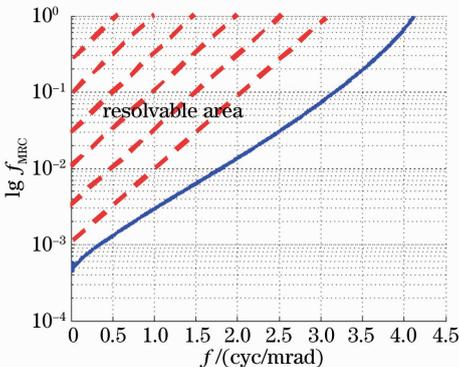


图 1 典型光电成像系统 $f_{\text{MRC}}(f)$ 曲线

Fig. 1 $f_{\text{MRC}}-f$ curve of a CCD imaging system

一确定的空间频率 f ,观察者通过光电成像系统恰好能分辨(50%概率)出条带目标图案时,目标与背景间的对比度 $C(f)$ 称为光电成像系统在空间频率 f 和场景平均亮度 $L_m = (L_b + L_t)/2$ 下的 $f_{\text{MRC}}(f, L_m)$

$$f_{\text{MRC}}(f, L_m) = \frac{f_{\text{SNR}_{\text{th}}} \sqrt{2N_{\text{av}} + N_{\text{ccd}}} \sqrt{N_x(x)N_y(y)}}{2N_{\text{av}} \sqrt{I_c} p_x(x) p_y(y)}, \quad (2)$$

式中具体参数定义见文献[6]。典型光电成像系统的 $f_{\text{MRC}}-f$ 曲线如图 1 所示,其中 MRC 曲线以上的区域为可分辨区域。

2.2 光电成像系统 MRC 的测量方法

2.2.1 直接测量法

通过平行光管、可控光阑积分球等在一定的亮度 L_a 下,将不同对比度 C_i 的 USAF 1951 3 条带靶图案(如图 2)标投射给光电成像系统,人眼通过显示器(电视型)或目镜(直视型)观察靶标,获得对应对比度下可分辨的靶标组块数,进一步查对靶板号和组块数确定条带宽度,并由平行光管焦距 f' 确定条带对应的空间频率值 f ,得到对应亮度 L_a 下的 MRC 曲线(C_i-f 曲线)。改变不同的亮度 L_a ,可得到多组 MRC 曲线^[8]。

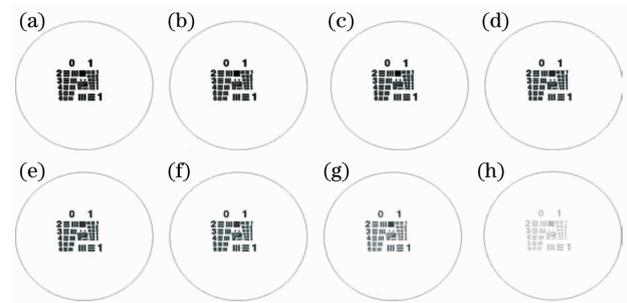


图 2 不同对比度下的 USAF 1951 3 条带靶图案

Fig. 2 USAF 1951 resolution testing pattern at different contrast levels

2.2.2 基于心理测量方程的测量方法

Weibull^[9,10]心理测量方程的数学模型为

$$p(x) = 1 - 2^{-1-(x/a)^\beta}, \quad (3)$$

式中 $p(x)$ 为正确响应的概率; x 为心理刺激强度; β 为决定曲线斜率的参数(对光电成像系统, $\beta=3$); a 为阈值刺激强度。

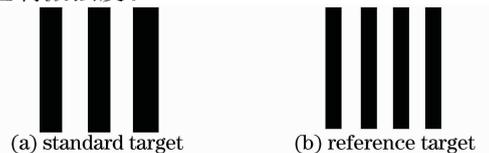


图 3 选择性靶标

Fig. 3 Selective target bar

基于 Weibull 心理测量方程的 MRC 测量方法要求生成一个由标准靶和参考靶组成的选择性靶标(如图 3)。标准靶和参考靶分别是处于均匀背景中高宽比 5:1 的三条带图案和高宽比 7:1 的 4 条带图案,标准靶和参考靶的条带方向、靶面面积和对比度相同,二者的区别仅是参考靶空间频率为标准靶的 7/5 倍。根据选择性靶标的要求,在测试系统上生成选择性靶标,通过光电成像系统在显示器上供测试人员观察,其中靶的方向、亮度 L_a 、空间频率 f (lp/mm) 和对比度 C_i 可控,但在选择性靶标中标准靶和参考靶的相对位置随机控制。测试者观察被测光电成像系统的输出图像并辨别出标准靶在选择性靶标的位置。在给定的背景亮度 L_a 和空间频率 f 条件下,由测得的实验数据 $\{C_i, p(C_i)\}$ 拟合式(2)曲线,并由 $p=75\%$ 时的 C_p 确定为 $f_{MRC}(f, L_a)$ 。保持背景亮度 L_a 不变,改变空间频率 f ,重复上面的测量和处理过程,可得到一组实验数据 $\{f, f_{MRC}(f, L_a)\}$,拟合曲线得到被测系统的 $f_{MRC}-f$ 曲线。

3 基于光电成像系统 MRC 的作用距离模型

3.1 目标与场景模型

对于扩展源目标的作用距离依然采用目标等效条带图案^[1],假设目标和背景均为朗伯体,反射比分别为 ρ_t 和 ρ_b ,目标尺寸为 $w \times h$ (在一些应用中,也可用目标尺寸的几何平均值 $d = \sqrt{wh}$ 进行一维分析),则在环境照度 E_0 条件下,目标和背景亮度为

$$L_x = \frac{\rho_x}{\pi} E_0, \quad x = t, b \quad (4)$$

目标与背景的固有对比度 C_0 为

$$C_0 = \frac{L_t - L_b}{L_t + L_b} = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t + \rho_b} \quad (5)$$

目标条带图案的周期数 N 由视觉任务及概率要求确定。根据 Johnson 准则,在 50% 概率条件下的条带周期数为 N_{50} (探测为 1,识别为 4,认清为 6.4)^[11]。对应概率 P 的条带周期数 N 满足

$$P = \frac{(N/N_{50})^E}{1 + (N/N_{50})^E}, E = 2.7 + 0.7 \left(\frac{N}{N_{50}} \right) \quad (6)$$

3.2 大气传输的影响

大气传输对场景目标辐射的影响主要表现在对景物辐射能量、对比度以及景物细节的衰减。

景物辐射能量衰减:用大气透射比 $\tau(\lambda, R)$ 表示,可用 LOWTRAN 或 MODTRAN 等专业软件计算。在无相关软件时,可用简化的经验公式^[1]

$$\tau_a(\lambda, R) = \exp \left[- \frac{3.912}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q R \right], \quad (7)$$

式中

$$q = \begin{cases} 0.585R_v^{1/3} & R_v < 6 \text{ km} \\ 1.3 & R_v \sim 10 \text{ km} \\ 1.6 & R_v > 50 \text{ km} \end{cases}$$

式中 R_v 为大气能见度;通常取 $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ 或 $\lambda_0 = 0.61 \mu\text{m}$ 。(7)式用于白光可见光时,可改写为

$$\tau_a(R) = \exp \left[- \frac{3.912}{R_v} R \right]. \quad (8)$$

景物对比度衰减:可用对比度传递函数 $T_c(R)$ 表示

$$T_c(R) = 1 / \left[1 + \frac{L_v(\infty)}{L_b(0)} \frac{1 - \tau_a(R)}{\tau_a(R)} \right] = 1 / \left[1 + K \frac{1 - \tau_a(R)}{\tau_a(R)} \right], \quad (9)$$

式中 $L_v(\infty)$ 为以天空为背景的大气路程辐亮度; $L_b(0)$ 为背景亮度; K 为地平天空亮度与背景亮度之比。 T_c 是 K 和 τ 的函数,即 T_c 与目标和探测器之间的大气状态有关, T_c 与 K 的关系曲线如图 4,文献[1,12]给出了典型景物背景下 K 的取值范围。 K 值也可以利用 MODTRAN 软件包进行计算得到。

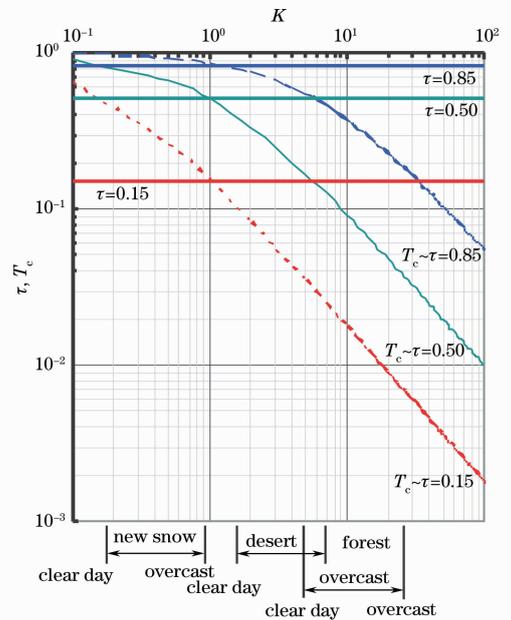


图 4 T_c 与 K 的关系曲线

Fig. 4 Relation curves between T_c and K

于是,光电成像系统前的景物表观对比度为^[13]

$$C(R) = C_0 T_c(R). \quad (10)$$

景物细节衰减:由于大气散射的影响,辐射在大气中的传输也将引起场景细节的衰减,通常可以用高斯型的传递函数表示,但高斯函数系数与大气特征参数的关系尚没有公认的表达式。对于一般应用条件,暂不考虑大气对景物细节的衰减。

3.3 作用距离模型

对于扩展源目标,通过光电成像系统能够探测、识别和认清目标的条件是:1) 目标具有足够的张角;2) 目标/背景的表现对比度应大于等于光电成像系统可分辨对比度 f_{MRC} 。即

$$\begin{cases} \frac{d}{NR} \geq \frac{1}{f}, \\ C_0 T_c(R) \geq f_{MRC} [f, L_m(R)], \end{cases} \quad (11)$$

式中 $L_m(R) = L_{m0} \tau_a(R) + L_v(R)$ 为景物表现平均亮度; $L_v(R)$ 为路程的气柱亮度; $L_{m0} = (L_t + L_b) / 2$; d 为目标等效尺寸; C_0 为目标背景固有对比度; f 为空间频率。满足(11)式的最大距离 R_m 即为系统在对任务(探测、识别和认清)及其概率条件下的作用距离。

4 计算过程及其分析

为了说明本文模型作用距离预测的计算过程,并与直接用 IFOV 和 Johnson 准则的极限分辨角法进行比较,以一个实际 CCD 成像系统进行计算分析。

采用敏通 03K9H-EX 1/3" 黑白高解析低照度 CCD^[14] 成像组件(图 5),探测器像元数 795×596 ,探测器单元尺寸 $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$,探测器阵列尺寸 $4.8 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$,最低工作照度 0.01 lx ;采用 75 mm 焦距的光学镜头, F 数为 1.4 ; $14''$ 黑白监视器,水平分辨率为 800 TVL ,高宽比 $4:3$;按照目标场景亮度 1000 cd/m^2 ,计算得到系统 MRC 曲线如图 6 所示。假设 $2.3 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ 的坦克目标反射比为 $\rho_t = 25\%$;以山林为背景,背景平均反射率为 $\rho_b = 15\%$,则目标与背景的固有对比度 $C_0 = 25\%$ 。按照(6)式,在识别概率为 50% 和 95% 时所需要的目标条带周期数为 4 和 8 。按照极限分辨角法,对应 50% 和 95% 概率的识别距离分别为 7.19 km 和 3.59 km ,其与气象及路径条件无关,显然这与实际情况不符,只能表示一种极限情况。



图 5 03K9H-EX CCD 板式摄像机

Fig. 5 03K9H-EX CCD board camera

为此,取海平面水平路径,能见度 R_v 分别取 1 km (阴天 $K = 11$), 2 km (阴天 $K = 10$), 5 km (霾

$K = 8$), 10 km (晴天 $K = 5$)和 20 km (阴天 $K = 5$),按照(8)式和(9)式计算的其中几个大气透射比和大气对比传递函数随距离的变化如图 7 所示。根据图 6 和图 7 的结果,由(11)式可计算得到对应概率 50% 和 95% 的识别距离如表 1 所示。

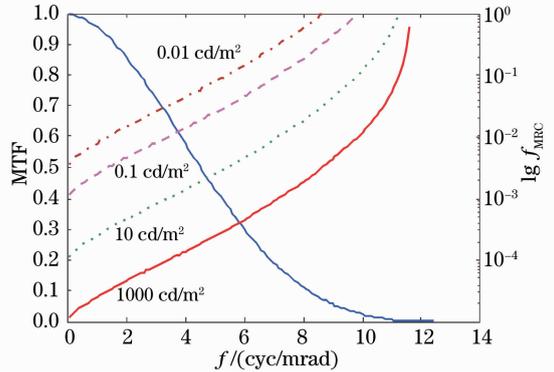


图 6 CCD 成像系统的 MRC 曲线

Fig. 6 MRC curves of the CCD imaging system

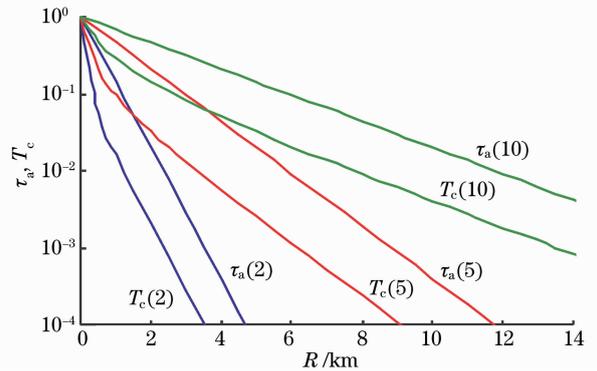


图 7 以山林为背景在几种 R_v 下的 τ_a 和 T_c

Fig. 7 Relation curves between τ_a , T_c under different visibilities R_v in forest background

表 1 几种能见度下的识别距离

Table 1 Recognition distance under different visibilities

R_v / km	K	Recognition distance / km	
		probability of 50%	probability of 95%
1	11	1.48	1.21
2	10	2.42	1.81
5	8	4.15	2.57
10	5	5.35	2.94
20	5	6.61	3.40

由图 6,图 7 和表 1 及其分析可以看出:1) 在考虑了多种因素之后,实际系统的分辨力一般都低于由 IFOV 确定的极限分辨力。图 8 给出了航天可见光遥感成像实验得到分辨地面典型目标所需要的系统分辨力。实际系统的 IFOV 设计应较地面分辨力对应的分辨角适当减小;2) 成像系统作用距离受分辨角和阈值对比度的限制,虽然 95% 概率识别所需

的条带数约为 50% 功率的 2 倍,但由于对比度的限制,50% 概率较 95% 概率的识别距离随能见度在增加逐渐向 2 倍逼近,在 1 km 能见度时两者只相差 0.27 km;3) 由于光学系统放大率、近红外光谱响应等的作用,在一定能见度以下,系统的识别距离可与能见度相当,甚至超能见距离,即超视距成像是较低能见度条件下实现;4) 取 $N_{50} = 1$ 和 6.4,以上方法可以分析系统对扩展源目标的探测距离和认清距离;5) 更精确的预测计算,需进一步采用光谱计算方法,并可进行探测器响应光谱、不同景物特性、超视距等的分析。

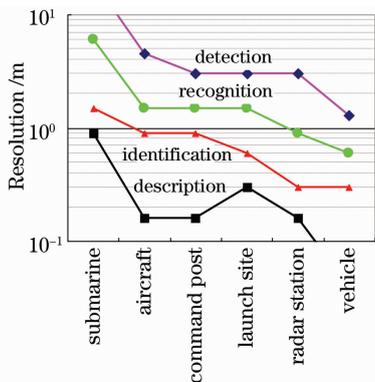


图 8 可见光遥感成像分辨典型目标的分辨力

Fig. 8 Resolution of visible remote sensing imaging system for typical target

综上所述,由于基于 MRC 的作用距离模型考虑了目标与背景特性、环境路径以及大气特性、光电成像系统特性等因素,其预测结果较极限分辨角法更科学合理,接近实际,并可用于系统优化设计。

5 结 论

可见光/近红外光电成像系统的总体设计是实际系统设计的重要环节,本文研究光电成像系统对扩展源目标的作用距离预测方法,给出了最小可分辨对比度的定义及其测量方法;提出了基于 MRC 的作用距离模型;结合实际系统,介绍了模型的计算过程,分析了计算方法的特点。由于综合考虑了目标与背景特性、环境路径以及大气特性、光电成像系统特性等因素,该作用距离预测方法较传统基于 IFOV 的极限分辨角方法更为合理科学。

本文方法经过适当的变形和修改,可有效地进行陆上、海上以及航空航天遥感等可见光/近红外光

电成像系统的性能评价,具有广泛的应用前景。我们已初步完成了相应的性能评价模型和分析软件,可为有关的应用提供科学有效的手段。

参 考 文 献

- Bai Tingzhu, Jing Weiqi. Principle and Technology of Photoelectric Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006
- 白廷柱,金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2006
- Qin Yanhua, Zhao Junmin. Analysis of identify capability for CCD imaging system[J]. *J. Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, **26**(1): 58~61
- 秦琰华,赵军民. CCD 成像系统识别能力分析研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, **26**(1): 58~61
- Wang Weiguo, Chen Tao, Zhang Tongshuang. The research for effective distance of TV system on a theodolite[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2005, **26**(8): 68~79
- 王伟国,陈涛,张同双. 电视成像系统作用距离分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(8): 68~79
- F. A. Rosell, R. H. Willson. Recent psychophysical experiments and the display signal to noise ratio concept[M]. Chapter 5 of Perception of Displayed Information, L. M. Bilberman, editor, Plenum, 1973
- W. Frame. Minimum resolvable and minimum detectable contrast prediction for monochrome solid-state imagers [J]. *SMPTE J.*, 1987: 454~460
- Gordon Arthur. Prediction and measurement of minimum resolvable contrast for TV sensors [C]. *SPIE*, 1994, **2223**: 533~542
- Vollmerhausen R. chapter: Modeling the Performance of Imaging Sensors in Electro-Optical Imaging Systems and Modeling[M]. L. Biberman ed., Ontar Cdrp, Andover, MA, 1999
- EO Test Lab Manual(3.0). pdf[EB/OL]. www.electro-optical.com
- A. B. Watson. Probability summation over time [J]. *Vision Research*, 1979, **19**: 515~522
- Li Shengcai, Jin Weiqi, Zhang Jianyong et al.. Electro-optical imaging system performance parameter MRC and its measurements[J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6): 5~8
- 李升才,金伟其,张建勇等. 光电成像系统性能参数 MRC 及其测量方法[J]. *红外技术*, 2004, **26**(6): 5~8
- Zhu Ying, Chang Benkang, Liu Lei. Influence of the frame integral time to detecting distance of low light level-TV [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 259~262
- 朱莹,常本康,刘磊. 帧积分时间对微光电视观察视距的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 259~262
- Electro-Optical Handbook. USA RCA Inc[M]. Shi Si, Wu Suo transl., Beijing: National Defense Industry Press, 1978
- 美国 RCA 公司. 电光学手册[M]. 史斯,伍锁译,北京:国防工业出版社, 1978
- Liu Lei, Chang Benkang. The revised formula for visual range of low light level imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 761~765
- 刘磊,常本康. 微光成像系统视距理论公式的修正[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 761~765
- 03K9H-EX 1/3" B/W Board CCD Camera [EB/OL]. www.mintron.com