

doi: 10.3788/gzxb20164503.0312003

# 低照度成像组件的最小可分辨率对比度 测量及其作用距离模拟

刘松<sup>1</sup>, 金伟其<sup>1</sup>, 李力<sup>1</sup>, 李本强<sup>2</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 北京洪润康光电工程技术有限公司, 北京 100085)

**摘 要:**搭建了一套光电成像系统的最小可分辨对比度测试实验系统,并对 MTV-1881-EX 型低照度 CCD 和 NOCTURN XL 型超低照度 CMOS 成像系统的最小可分辨对比度进行了测量,分析了对应两款低照度成像组件在相同焦距、相同瞬时视场、相同视场条件下的作用距离,结果表明:1)超低照度 CMOS 成像组件具有更好的低照度成像质量;2)基于最小可分辨对比度的作用距离模型由于考虑了系统信噪比、调制传递函数和景物对比度等因素,可更有效地预测光电成像系统的作用距离;3)在相同瞬时视场或成像视场条件下,超低照度 CMOS 成像系统具有更佳的作用距离.本文方法对于拓展基于最小可分辨对比度的光电成像系统作用距离模型的应用具有重要的作用.

**关键词:**低照度;最小可分辨对比度;作用距离;CCD/CMOS;测量;焦距;视场

中图分类号:TN223

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)03-0312003-8

## Minimum Resolvable Contrast Measurement of Low Illumination Imaging Module and Simulation of Its Range

LIU Song<sup>1</sup>, JIN Wei-qi<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, LI Ben-qiang<sup>2</sup>

(1 MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Beijing HRK Photoelectric Engineering Co., Ltd, Beijing, 100085, China)

**Abstract:** A contrast test measurement system of minimum resolvable was built. For the low illumination MTV-1881-EX CCD and the super low illumination NOCTURN XL CMOS imaging system, the minimum resolvable contrast was measured and discussed; the range of those low illumination modules were predicted and discussed under the conditions of the same focal length, the same instantaneous field of view and the same view of imaging system. The results show: 1) The super low illumination CMOS has a better low illumination imaging quality; 2) The range model can predict the range of imaging system more effective, because the range model based on Minimum Resolvable Contrast considers the system signal-to-noise ratio, the Modulation Transfer function and the contrast of scene; 3) under the condition of the same imaging field or instantaneous field of view, the super low illumination CMOS imaging system has a better range. The method of this paper is expected to play an important role in the development of the application, that is the range model of optical imaging system based on minimum resolvable contrast.

**Key words:** Low illumination; Minimum resolvable contrast; Range; CCD/CMOS; Measurement; Focal length; Field

**OCIS Codes:** 120.4640; 040.3780; 040.5160; 040.6070

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61231014)、青年基金项目(No. 6105013)和总装十三五重点预研项目(No. 40405030302)资助

第一作者:刘松(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电成像系统性能测试与评价方法. Email:liusong19910613@126.com

导师(通讯作者):金伟其(1961-),男,教授,博导,主要研究方向为夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等. Email:jinwq@bit.edu.cn

收稿日期:2015-08-20;录用日期:2015-12-07

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

随着工业、农业、医学、空间监控等领域对低照度视频成像的迫切需求,低照度 CCD/CMOS 成像技术得到迅速发展.1998 年 SONY 公司开发的“EX-VIEW HAD CCD”技术<sup>[1]</sup>,提高了 CCD 在近红外波段的响应,并使其灵敏度大幅地提高,在低照度环境( $10^{-2}$  lx)下可得到高清晰的成像.20 世纪初美国 TI 公司和英国 E2V 公司相继推出电子倍增 CCD 器件“Impactron-CCD”<sup>[2]</sup>和“L3CCD”<sup>[3]</sup>产品,通过电荷转移过程中的电子倍增,实现 1000 倍以上的增益,可用于昼间和环境照度  $10^{-3}$  lx 以上成像.2013 年以来,法国 PHOTONIS 公司及美国 SiOnyx 公司在传统 CMOS 成像器件基础上,通过探测器结构以及微小信号处理等优化技术,分别研发出超低照度 CMOS 成像系统 NOCTURN XL<sup>[4]</sup>和 XQE (Extended Quantum Efficiency)<sup>[5]</sup>产品,最低工作照度拓展到  $10^{-3}$  lx 夜天光水平.

光电成像系统的性能评价一直是人们关注的重要问题,特别是低照度条件下,光电成像系统的性能不仅受系统传递特性限制,也受到系统信噪比的限制,难以单纯采用传统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 来进行系统作用距离或分辨特性的描述.最小可分辨对比度 (Minimum Resolvable Contrast, MRC) 是包含传递特性和信噪比等因素,可定量描述光电成像系统性能的评价参量<sup>[6]</sup>.1972 年 F. A. Rosell 和 R. A. Willson<sup>[7]</sup>提出关于电视摄像机的 MRC 模型;Frame 分别于 1985<sup>[8]</sup>年和 1987<sup>[9]</sup>年提出摄像系统的工业用 MRC 模型,但没有考虑人眼视觉的传递特性;1995 年 Vollmerhausen<sup>[10]</sup>在 Rosell 工作基础上将人眼的对比度阈值引入 MRC 模型;2003 年周燕等<sup>[11]</sup>研究了基于人眼视觉的直视型微光成像系统 MRC 模型;2006 年李升才等<sup>[12]</sup>研究了电视型微光成像系统的 MRC 模型.在 MRC 测量方面,1994 年 Gordon Arthur 提出 MRC 主观测量法<sup>[13]</sup>,解决了背景光的控制问题,可灵活地实现对比度的连续可调;1999 年 Piet Bijl 和 J. Mathieu Valetton<sup>[14]</sup>提出基于 Weibull 心理测量方程

的 MRC 测量方法;1998 年 Orlando<sup>[15]</sup>提出基于数字信号处理的 MRC 自动测量法;2004 年李升才<sup>[16]</sup>研究了基于强迫性选择的 MRC 测量方法;2006 年李文娟<sup>[17]</sup>设计了一种对比度可调的 MRC 测量方法;2009 年罗华<sup>[18]</sup>对 CCD 相机的 MRC 进行测试评价.

作用距离是评价光电成像系统的一个重要指标,是在系统设计和方案论证时的主要内容,传统的基于瞬时视场的作用距离预测方法在低照度条件下存在较大的误差.2009 年金伟其等<sup>[19]</sup>提出了基于光电成像系统 MRC 的扩展源目标作用距离预测方法,充分考虑了目标/背景特性、大气传输影响、光电成像系统传递特性及人眼视觉特性等因素,可更合理地预测光电成像系统的作用距离,但 MRC 的计算或测量是方法的关键.本文将在对低照度 CCD/CMOS 成像组件 MRC 测量的基础上,分别在相同的焦距、瞬时视场和视场角条件下对基于 MRC 的作用距离进行模拟计算,分析相应成像组件的成像特性,并验证作用距离预测方法的有效性.

## 1 低照度 CCD/CMOS 成像组件 MRC 测量

最小可分辨对比度的测量原理是:将具有不同空间频率的黑色三条带测试图案放置于均匀白色背景中,改变测试条带图案的对比度,观察者通过待测光电成像系统观察测试图案,当观察者恰好能分辨出条带测试图案时,对应条带图案的对比度称为光电成像系统在该空间频率  $f$  下的最小可分辨对比度 MRC.定义测试条带图案的对比度为

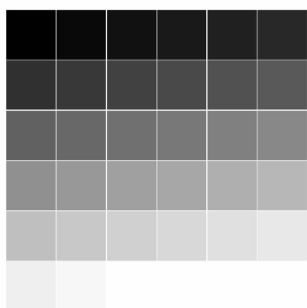
$$C_0 = \left| \frac{L_t - L_b}{L_t + L_b} \right| = \left| \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t + \rho_b} \right| \quad (1)$$

式中,  $L_t$ 、 $L_b$  分别为黑条带和白色背景的亮度;  $\rho_t$  和  $\rho_b$  分别为黑条带和白色背景的反射率.

### 1.1 MRC 的测试系统

#### 1.1.1 测试靶标

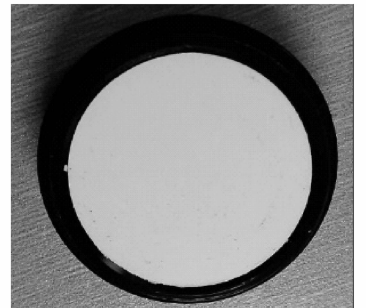
为了获得不同对比度的靶标图像,首先制作了不同灰度值的测试靶标,图 1(a)为灰度值靶标从 0 到



(a) Different gray value targets



(b) Spectrometer



(c) Standard white plate

图 1 靶标反射率测试靶标及其测试设备  
Fig. 1 Target reflectivity testing target and testing equipment

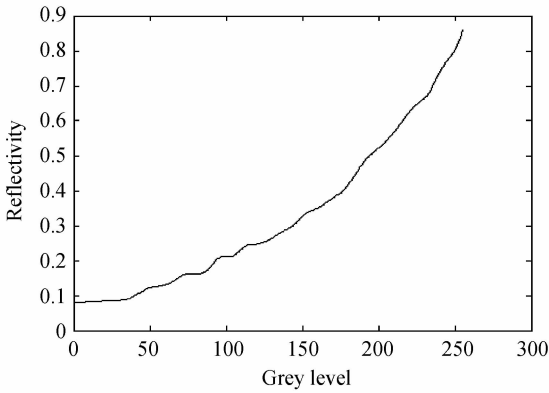


图2 不同灰度值的插值反射率曲线

Fig.2 Interpolation reflectance curve of different gray values 255, 间隔为 8, 按  $6 \times 6$  从小到大排列的测试靶块(最后 3 个块的灰度级为 255), 每一个灰度靶块的大小为  $256 \times 256$  像素, 实际大小为  $28 \times 28 \text{ mm}^2$ . 采用光谱仪 SpectraScan PR715(图 1(b)) 和标准白板(图 1(c)), 在

照度  $1.1 \text{ lx}$  的 A 光源照明下, 由比值法测得测试靶标黑/白条带灰度值与反射率的关系如图 2 所示. 利用式 (1) 可确定不同灰度靶块之间的对比度.

采用相同的打印机制作了 12 幅用于 MRC 测量的三条带分辨率靶标图案(如图 3 给出其中 8 种图案), 其中背景白色均采用 255 灰度级, 黑色条带的对比度分别对应 3%、5%、10%、14%、19%、23%、35%、50%、60%、72%、82% 和 93%; 图中包含多组三条带黑白条纹, 每一组包含有 6 块条纹, 每块条纹包括长宽比为 5 (1 的水平和垂直三条带条纹. 相邻组相同块号之间的条纹宽度是 2 倍关系(例如第-2 组第 1 对条纹的宽度是第-1 组第 1 对的 2 倍, 即后者分辨率是前者的 2 倍), 组内相邻块的条纹宽度为  $21/6$  的关系(例如第 0 组第 1 对条纹的宽度是第 2 对条纹宽度的  $21/6$  倍, 即后者的分辨率是前者的  $21/6$  倍).

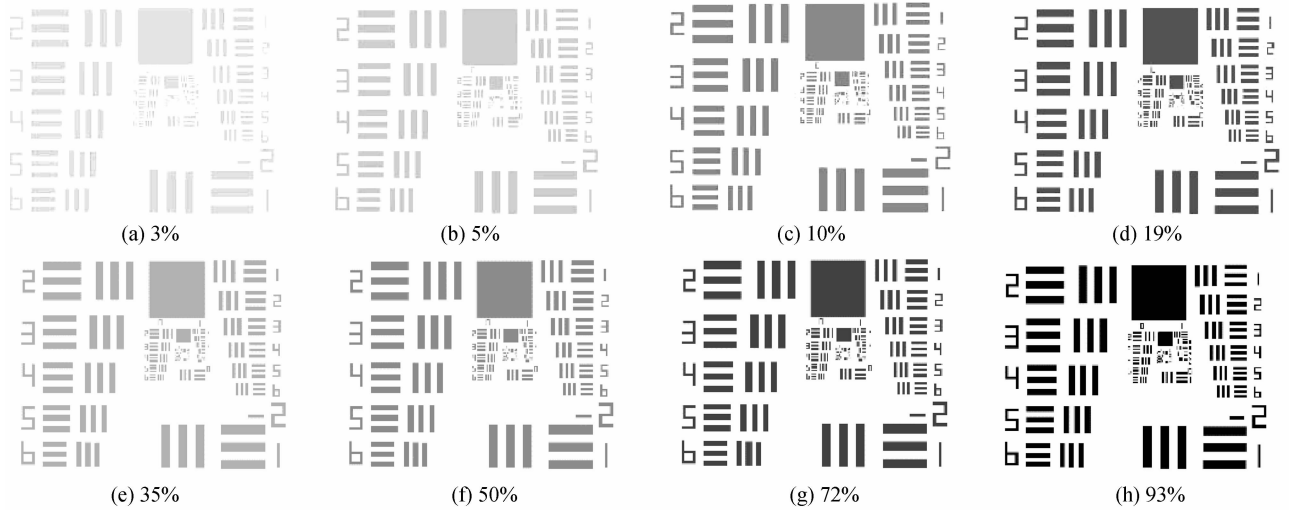


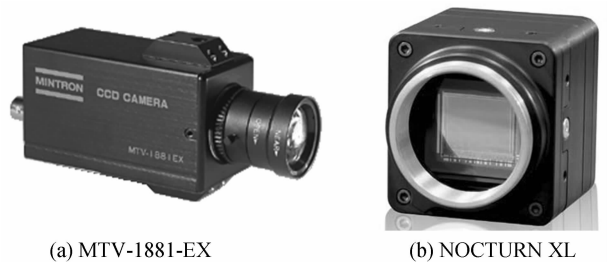
图3 8 种不同对比度的三条带分辨率测试靶标图案

Fig.3 Eight different contrast three stripe resolution test target patterns

### 1.1.2 低照度 CCD/CMOS 成像组件

为了比较低照度 CCD/CMOS 成像组件的性能, 选用了基于 SONY EX-VIEW CCD 芯片的低照度高解析成像组件 MTV-1881-EX 以及法国 PHOTONIS 公司超低照度 CMOS 成像组件 NOCTURN XL(如图 4), 表 1 给出了两种成像组件的主要性能参量.

摄像镜头选用型号 M5018-MP2 的  $f' = 50 \text{ mm}$  镜头, 光圈范围  $F1.8 \sim F22$ , C-Mount 接口. 显示器为 19 英寸 HA191DPB, 分辨率  $1280 \times 1024$ , 动态对比度  $1000 : 1$ , 亮度为  $250 \text{ cd/m}^2$ .



(a) MTV-1881-EX

(b) NOCTURN XL

图4 低照度 CCD/CMOS 成像组件

Fig.4 Low illumination CCD/CMOS imaging components

表 1 低照度 CCD/CMOS 成像组件的性能参量

Table 1 Low illumination CCD/CMOS imaging component performance parameters

Parameters	MTV-1881-EX CCD	NOCTURN XL CMOS
Pixel number	795×596	1 280×1 024
Pixel size	8 μm×8 μm	9.7 μm×9.7 μm
Detector size	1/2"	1"
Working illumination(lowest)	2×10 <sup>-2</sup> lx (F1, 2,5600K)	1×10 <sup>-3</sup> lx
SNR	>48 dB	>60 dB
Video mode	CCIR	digital video, progressive scanning
Frame frequency	25 Hz	30,50,60,100 Hz

1.1.3 低照度 CCD/CMOS 成像组件的 MRC 测量方法

MRC 测量实验在暗室进行,搭建好实验平台,关闭照明设备,保持室内黑暗,以避免环境光对靶面照度及成像系统的影响. MRC 测量实验采用标准 A 光源经过积分球后照射靶,以获得均匀的靶面照度. 照度计采用北京理工大学自制的 KZD-5 型宽量程微照度计(如图 5),量程 10<sup>-1</sup>~10<sup>-6</sup> lx. 照度计置于靶标处,测量靶标处的照度  $E$ . 调节摄像镜头和 CCD/CMOS 摄像机的位置,使实验人员在显示器上可看到清晰的靶标图像,测得靶标到摄像机的距离  $L$  为 4.2 m( $L \gg f' = 50$  mm,可以认为成像在物镜的焦平面上). 分别采用

低照度 CCD 和超低照度 CMOS 成像组件在不同靶面照度情况下对不同对比度靶标进行视频摄像,并在显示器上显示动态视频图像;由 4 名受过训练的观察人员观察并记录可清楚分辨的靶标水平和垂直方向的组/块号;最后由 3 人可分辨的最大组/块号作为 50% 概率的分辨极限,由靶标条带宽度  $W$  和靶标距离  $L$ ,计算得到在对应照度  $E$  和对比度  $C$  下可分辨的靶标条带极限空间频率  $f = 2W/L$ .

1.2 MRC 测量结果及其分析

如果不考虑各成像环节传递特性的衰减,成像系统的瞬时视场可以作为系统的一种分辨极限评价参量. 对于固定物镜焦距为 50 mm 的情况,低照度 CCD 成像组件的理想空间分辨极限为 3.125 cyc/mrad,超低照度 CMOS 成像组件的理想空间分辨极限为 2.577 cyc/mrad.

表 2 和表 3 分别给出了低照度 CCD/CMOS 成像系统针对不同对比度靶标,在靶面照度 5×10<sup>-3</sup> lx、1.1×10<sup>-2</sup> lx、5.6×10<sup>-2</sup> lx、5.8×10<sup>-1</sup> lx、4.01×10<sup>0</sup> lx、1.38×10<sup>1</sup> lx 下测得的极限分辨率(由靶标宽度及距离折算得到),进一步由其转换得到的 MRC 曲线分别如图 6 所示. 可以看出:



图 5 KZD-5 型宽量程微照度计  
Fig. 5 KZD-5 low illumination meter

表 2 CCD 最小可分辨对比度测量数据

Table 2 Minimum resolvable contrast measurement data of CCD

Contrast	Spatial frequency(cyc/mrad)											
	0.005lx		0.011lx		0.056lx		0.58lx		4.01 lx		13.8 lx	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
0.03	0	0	0	0	0.467	0.467	0.875	0.875	0.875	0.875	0.955	0.955
0.05	0	0	0.191	0.191	0.700	0.700	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050	1.050
0.10	0	0	0.300	0.300	0.875	0.875	1.167	1.167	1.167	1.167	1.313	1.313
0.14	0	0	0.323	0.323	1.050	1.050	1.167	1.167	1.313	1.313	1.500	1.500
0.19	0	0	0.420	0.420	1.313	1.313	1.500	1.500	1.500	1.500	1.750	1.750
0.23	0	0	0.525	0.525	1.313	1.313	1.500	1.500	1.750	1.750	1.909	1.909
0.35	0.323	0.323	0.700	0.700	1.500	1.500	1.909	1.909	1.909	1.909	2.100	2.100
0.50	0.323	0.323	0.875	0.875	1.750	1.750	1.909	1.909	2.100	2.100	2.100	2.100
0.60	0.467	0.467	0.955	0.955	1.750	1.750	2.100	2.100	2.100	2.100	2.333	2.333
0.72	0.525	0.525	1.050	1.050	1.750	1.750	2.100	2.100	2.333	2.333	2.333	2.333
0.82	0.600	0.600	1.050	1.050	1.750	1.750	2.100	2.100	2.333	2.333	2.333	2.333
0.93	0.700	0.700	1.050	1.050	1.750	1.750	2.333	2.333	2.333	2.333	2.625	2.625

表 3 CMOS 最小可分辨对比度测量数据

Table 3 Minimum resolvable contrast measurement data of CMOS

Contrast	Spatial frequency(cyc/mrad)											
	0.005lx		0.011lx		0.056lx		0.58lx		4.01 lx		13.8 lx	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
0.03	0	0	0.323	0.323	0.600	0.600	0.600	0.600	0.840	0.840	0.875	0.875
0.05	0.323	0.323	0.467	0.467	0.840	0.840	0.875	0.875	0.955	0.955	1.050	1.050
0.10	0.323	0.323	0.600	0.600	0.955	0.955	0.955	0.955	1.167	1.167	1.167	1.167
0.14	0.467	0.467	0.840	0.840	1.050	1.050	1.050	1.050	1.313	1.313	1.500	1.500
0.19	0.600	0.600	0.840	0.840	1.050	1.050	1.167	1.167	1.500	1.500	1.750	1.750
0.23	0.700	0.700	0.875	0.875	1.167	1.167	1.167	1.167	1.500	1.500	1.750	1.750
0.35	0.840	0.840	0.955	0.955	1.313	1.313	1.313	1.313	1.750	1.750	1.909	1.909
0.50	0.840	0.840	1.050	1.050	1.313	1.313	1.313	1.313	1.750	1.750	2.100	2.100
0.60	0.840	0.840	1.050	1.050	1.313	1.313	1.500	1.500	1.909	1.909	2.100	2.100
0.72	0.875	0.875	1.167	1.167	1.313	1.313	1.500	1.500	2.100	2.100	2.333	2.333
0.82	0.955	0.955	1.167	1.167	1.500	1.909	1.909	1.909	2.100	2.100	2.333	2.333
0.93	1.050	1.050	1.167	1.167	1.500	1.909	1.909	1.909	2.333	2.333	2.333	2.333

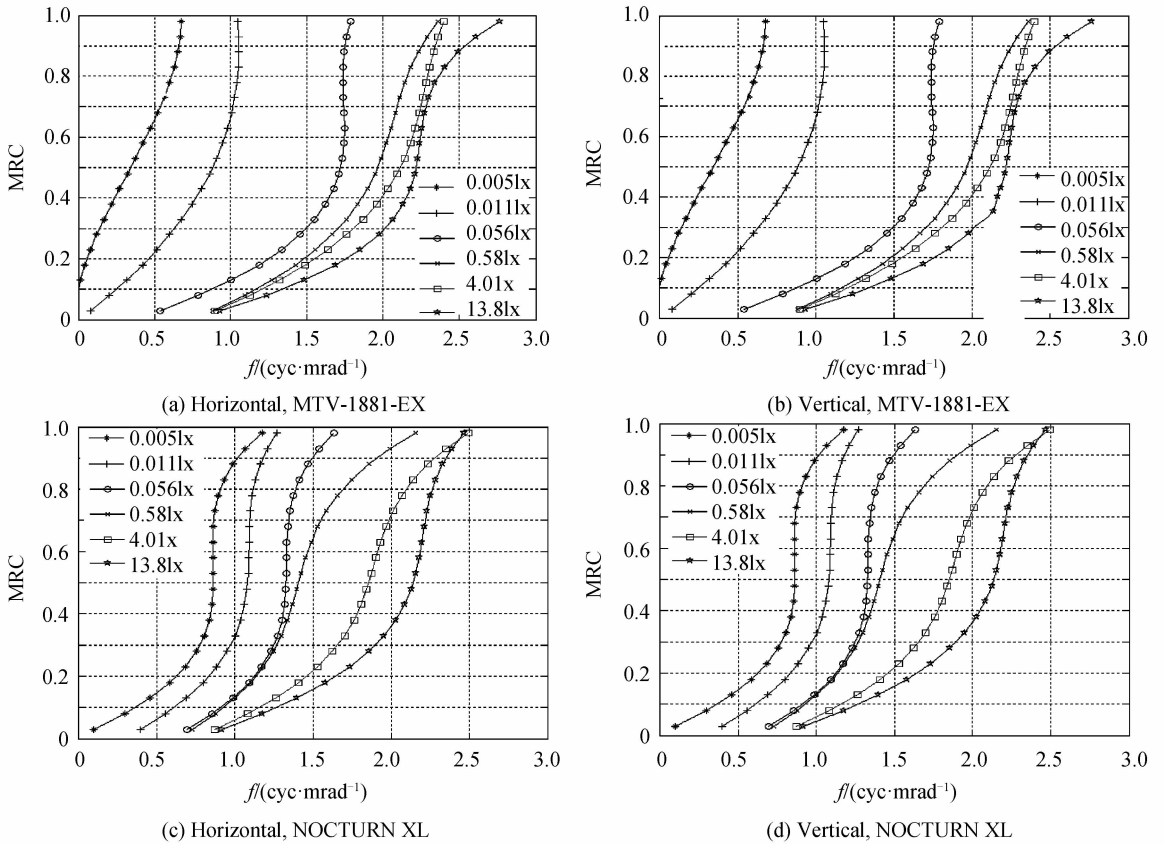


图 6 CCD 和 CMOS 的 MRC 测试曲线

Fig. 6 MRC test curves of CCD and CMOS

1) 不同照度条件下, 低照度 CCD 摄像机和超低照度 CMOS 摄像机的 MRC 随着目标空间频率增大而增大, 即高频条纹需更高的对比度才能分辨;

2) 在相同照度和对比度条件下, 低照度 CCD 摄像机和超低照度 CMOS 摄像机垂直方向分辨特性均略优于水平方向; 由于以瞬时视场角确定的低照度 CCD 摄像机具有更高的极限分辨率, 在  $5.8 \times 10^{-1}$  lx 以上

照度下低照度 CCD 摄像机的实测分辨特性优于超低照度 CMOS 摄像机, 但在低于  $1.1 \times 10^{-2}$  lx 的低照度情况下超低照度 CMOS 摄像机的分辨特性则优于低照度 CCD 摄像机, 这表明数字视频超低照度 CMOS 摄像机在低照度条件下的优越性;

3) 由于两种摄像机的极限分辨率都小于理想分辨极限, 说明光学系统以及后续信号处理等环节的影响

不可忽略,采用理想分辨极限作用距离的预测过于理想,特别是对于模拟视频图像的差距更为明显;

4)低照度 CCD 摄像机和超低照度 CMOS 摄像机的 MRC 曲线在不同照度情况下随目标空间频率的变化趋势大致相同,景物照度越大,MRC 越小;超低照度 CMOS 摄像机的最低工作照度优于低照度 CCD 摄像机.

## 2 基于 MRC 的低照度成像组件作用距离模拟与分析

作用距离是光电成像系统重要的性能参量,在系统设计和论证中,有效的作用距离模型可以使光电成像系统的设计更为科学合理.目前在一些应用中,人们往往只用简单的目标张角中包含光电成像系统瞬时视场的数目,并结合 Johnson 准则进行探测、识别距离的预测,这种方法未考虑光电成像系统空间传递特性、目标景物对比度及大气传输衰减等的影响,因此,作用距离的预测往往比较理想,较真实作用距离有明显的差距.

### 2.1 基于 MRC 的低照度成像系统的作用距离模型

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 MRC<sup>[19]</sup>.即

$$\begin{cases} \frac{d}{NR} \geq \frac{1}{f} \\ C_0 T_c(R) \geq MRC[f, L_m(R)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $L_m(R) = L_{m0} \tau_a(R) + L_v(R)$ 为景物表观亮度; $L_v(R)$ 为路程的气柱亮度; $L_{m0} = (L_t + L_b)/2$ ;  $d$ 为目标尺寸; $f$ 为空间频率; $\tau_a(R)$ 和  $T_c(R)$ 分别为大气透射比和对比度传递函数,定义为

$$\tau_a(R) = \exp \left[ -\frac{3.912}{R_v} R \right] \quad (3)$$

$$T_c(R) = 1 / \left[ 1 + K \frac{1 - \tau_a(R)}{\tau_a(R)} \right] \quad (4)$$

式中, $R_v$ 为大气能见度; $K$ 为地平天空亮度与背景亮度之比.满足式(2)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.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)<sup>[20]</sup>.对应条带周期数  $N$  的概率  $P$  为

$$P = \frac{(N/N_{50})^E}{1 + (N/N_{50})^E}, E = 2.7 + 0.7(N/N_{50}) \quad (5)$$

### 2.2 低照度成像组件的作用距离估算

在上述 MRC 测试设备以及 MRC 测量数据基础上,基于 MRC 的低照度成像系统作用距离模型,对这

2 款低照度成像系统的作用距离进行分析.

假设 2.3 m×2.3 m 的坦克目标(平均反射比  $\rho_t = 0.25$ )处于山林背景(平均反射率  $\rho_b = 0.15$ ),即目标与背景的固有对比度  $C_0 = 0.25$ ,由式(5),探测概率为 50%、识别概率为 50%和 95%时所需要的目标条带周期数分别为 1、4 和 8.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(晴天  $K=5$ ).按照式(3)和式(4)计算其中几个大气透射比和对比度传递函数随距离的变化曲线如图 7.

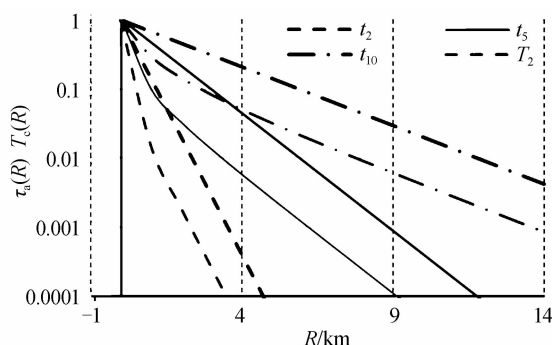


图 7 以山林为背景在几种  $R_v$  条件下的  $\tau_a(R)$  和  $T_c(R)$   
Fig. 7  $\tau_a(R)$  and  $T_c(R)$  under different  $R_v$  in forest background

根据图 7 和图 6,由式(2)可以对景物的作用距离进行估算,表 4 给出环境照度分别为  $1.38 \times 10^1$  lx 和  $1.0 \times 10^{-2}$  lx 时,两种低照度摄像机的探测距离和识别距离估算结果.可以看出:

1) CCD\CMOS 随着能见度的增大,探测距离与识别距离均增大,大气对系统作用距离的影响主要表现在对景物辐射能量的衰减以及对景物对比度的传递衰减,表中的大气能见度最大和最小时的作用距离变化可达 60% 以上;

2)  $1.0 \times 10^{-2}$  lx 较  $1.38 \times 10^1$  lx 条件下的作用距离有一定的下降,且说明低环境照度对 CCD\CMOS 成像的作用距离影响明显;

3) 由于作用距离模型考虑了大气透射比和对比度传递函数的影响,不同任务条件下的作用距离不是严格按照所需目标周期条带倍数变化,且作用距离明显低于仅靠瞬时视场 IFOV 所决定的结果;

4) 在  $1.38 \times 10^1$  lx 下,超低照度 CMOS 在较恶劣的气象条件下(能见距离为 1 km、2 km 时)的作用距离要优于低照度 CCD,在较好的气象条件下(能见距离为 5 km、10 km、20 km 时)的作用距离要小于低照度 CCD;

5) 在  $1.0 \times 10^{-2}$  lx 照度的各类气象条件下,超低照度 CMOS 的作用距离均优于低照度 CCD,这充分体现其数字成像以及低照度特性.

表 4 低照度 CCD/CMOS 成像系统的探测距离、识别距离估算

Table 4 Detection distance and Recognition distance estimation of Low illumination CCD/CMOS imaging systems

Illumination/ lx	$R_V$ /km	$K$	MTV-1881-EX CCD			NOCTURN XL CMOS		
			Detection/km	Recognition/km	Recognition/km	Detection/km	Recognition/km	Recognition/km
			(50%)	(50%)	(95%)	(50%)	(50%)	(95%)
$1.38 \times 10^1$	1	11	1.264	0.410	0.249	1.538	0.445	0.257
	2	10	1.381	0.500	0.298	1.596	0.515	0.296
	5	8	1.756	0.633	0.363	1.868	0.622	0.349
	10	5	2.161	0.745	0.416	2.193	0.716	0.394
	20	5	2.581	0.832	0.451	2.535	0.788	0.423
$1.0 \times 10^{-2}$	1	11	1.251	0.319	0.164	1.534	0.387	0.196
	2	10	1.257	0.330	0.173	1.537	0.394	0.203
	5	8	1.297	0.361	0.194	1.562	0.417	0.219
	10	5	1.399	0.406	0.216	1.634	0.453	0.237
	20	5	1.508	0.433	0.227	1.717	0.475	0.246

2.3 分析和讨论

当物镜焦距、相对孔径变化时,1.2 节测量的 MRC 会产生空间频率  $f$  和照度  $E$  的变化,即

$$f_{\text{new}} = \frac{f_1}{f_0} f_{\text{old}} \quad (6)$$

$$E_{\text{new}} = E_{\text{old}} \left\{ \frac{\left(\frac{D_1}{f_1}\right)^2 / \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D_1}{f_1}\right)^2\right]}{\left(\frac{D_0}{f_0}\right)^2 / \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D_0}{f_0}\right)^2\right]} \right\} \quad (7)$$

式中,  $f_{\text{old}}$  和  $f_{\text{new}}$  分别为焦距由  $f_0$  变为  $f_1$  前后的空间频率;  $E_{\text{old}}$  和  $E_{\text{new}}$  分别为焦距变化前后的环境照度;  $(D_0/f_0)$  和  $(D_1/f_1)$  分别为焦距变化前后的物镜相对孔径. 因此,理论上只要对图 6 和图 7 的 MRC 曲线的横坐标按式(6)进行一个线性变换,并将图中曲线对应的环境照度按式(7)进行变换就可以得到对应新物镜下成像系统的 MRC 曲线,按照前述的方法进行对应的系统作用距离估算.

在计算和分析中,物镜焦距  $f_0 = 50$  mm,  $F$  数  $F_{\text{No}}$  为  $F1.8$ . 由于低照度 CCD 探测器和超低照度 CMOS 探测器的单元尺寸和光敏面尺寸均不一样,因此,还可

表 5 超低照度 CMOS 在相同瞬时视场和成像视场角时的识别距离 ( $E_0 = 1.38 \times 10^1$  lx)

Table 5 Recognition distances of Low illumination CMOS in the same IFOV and FOV ( $E_0 = 1.38 \times 10^1$  lx)

$R_V$ /km	$K$	The same IFOV ( $f_1 (= 60.625$ mm)		The same FOV ( $f_1 = 96.875$ mm)	
		Recognition/km	Recognition/km	Recognition/km	Recognition/km
		(probability 50%)	(probability 95%)	(probability 50%)	(probability 95%)
1	11	0.520	0.299	0.775	0.434
2	10	0.599	0.346	0.868	0.502
5	8	0.727	0.410	1.057	0.606
10	5	0.841	0.466	1.235	0.697
20	5	0.933	0.504	1.394	0.767

3 结论

本文针对典型的低照度 CCD 和超低照度 CMOS 摄像机进行了实验室低照度环境下的最小可分辨对比

从瞬时视场角或成像视场等方面进行性能分析. 下面的讨论中,假设物镜焦距变为  $f_1$ ,但相对孔径保持不变,因此只要进行式(6)的频率转换.

按照瞬时视场角的定义<sup>[19]</sup>:探测器线性尺寸对系统物空间的两维张角,由探测器的形状、尺寸和光学系统的焦距决定. 如果按照相同瞬时视场角的要求进行比较,需要将低照度 CMOS 成像系统的物镜焦距增加为 60.625 mm. 同理,如果按照相同成像视场角的要求进行比较,CCD 探测器为 1/2 英寸 (6.4 mm × 4.8 mm), CMOS 探测器为 1 英寸 (12.4 mm × 9.9 mm), CMOS 成像系统的物镜焦距增加为 96.875 mm.

表 5 给出在环境照度  $1.38 \times 10^1$  lx 条件下,超低照度 CMOS 成像系统与 CCD 成像系统分别具有相同瞬时视场角 IFOV 和相同成像视场角 FOV 时的识别距离估算. 可以看出:随着焦距增大,超低照度 CMOS 的识别距离同步变大,在相同 IFOV 和相同的 FOV 条件下的作用距离全面超过低照度 CCD 成像系统,充分体现了超低照度 CMOS 摄像机的性能.

度 MRC 测量,并利用基于最小可分辨对比度的光电成像系统作用距离预测方法,分别估算了相同焦距、相同 IFOV 和相同 FOV 条件下的系统作用距离,结果表明:在相同焦距条件下,虽然在较高照度下低照度 CCD

摄像机的作用距离优于超低照度 CMOS 摄像机,但在较低照度下超低照度 CMOS 摄像机的作用距离将全面占优;在相同 IFOV 和相同 FOV 条件下更优于低照度 CCD 摄像机,这充分反映出其所具有的低照度成像特性。

MRC 是一个可描述摄像机在昼间和低照度条件下成像性能的有效参量,综合考虑了系统信噪比、MTF 和目标对比度等因素,由其进行的系统作用距离估算更接近实际,较之以往通过瞬时视场进行的作用距离估算具有更高的合理性.基于 MRC 的作用距离评价方法可为低照度成像系统的性能评价以及系统设计提供新的技术途径。

#### 参考文献

- [1] “EX-VIEW HAD CCD”技术[EB/OL]. www.sony.com.cn.
- [2] Impactron-CCD[EB/OL]. www.ti.com.cn.
- [3] L3CCD[EB/OL]. www.e2v.com.
- [4] NOCTURN XL CMOS[EB/OL]. www.photonis.com.
- [5] XQE (Extended Quantum Efficiency) [EB/OL]. www.laser-infrared.com.
- [6] 周立伟,刘玉岩.目标探测与识别[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [7] ROSELL F A, WILLSON R H. Basics of detection, recognition, and identification in E-O formed imagery[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1972, **0033**: 118.
- [8] FRAME W W. Minimum resolvable and minimum detectable contrast prediction for vidicon cameras[J]. *Smpete Journal*, 1985, **94**(1):21-27.
- [9] FRAME W W. Minimum resolvable and minimum detectable contrast prediction for monochrome solid-state imagers[J]. *Smpete Journal*, 1987, **96**(5):454-460.
- [10] VOLLMERHAUSEN R. Modeling the performance of imaging sensors in electro-optical imaging system and modeling[M]. BIBERMAN L, Ontar Corp;North Andover, 1998.
- [11] 周燕.基于人眼视觉的光电成像系统性能评价[D].北京:北京理工大学,2003:15-101.
- [12] LI Sheng-cai, JIN Wei-qi, ZHANG Wei-qiang. A novel method-based on forced-choice for MRC measurement [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(2):230-233.  
李升才,金伟其,张未强.一种基于性选择 MRC 测量的新方法[J]. *光学技术*, 2006, **32**(2): 230-233.
- [13] ARGHUR G. Prediction and measurement of minimum resolvable contrast for TV sensor [J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1994, **2223**: 533-542.
- [14] BIJL P, VALETON J M. Bias-free procedure for the measure of the minimum resolvable temperature difference and minimum resolvable contrast[J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(10): 1735-1742.
- [15] ORLANDO H J, PAPPAS M L, LOPEZ M A. Automated minimum resolvable contrast test;US, 5748230[P]. 1998-05-05.
- [16] LI Sheng-cai, JIN Wei-qi, ZHANG Jian-yong, et al. Performance parameters MRC and measurement method for photoelectric imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6):5-8.  
李升才,金伟其,张建勇.光电成像系统性能参量 MRC 及其测量方法[J]. *红外技术*, 2004, **26**(6):5-8.
- [17] LI Wen-juan, ZHANG Yuan, DAI Jing-min, et al. Study on the measurement technique of mrc invisible imaging system [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, **27**(1): 32-35.  
李文娟,张元,戴景民,等.可见光成像系统 MRC 测试技术的研究[J]. *计量学报*, 2006, **27**(1): 32-35.
- [18] LUO Hua, ZHANG Yuan. Evaluation of imaging quality of CCD cameras by measuring minimum resolvable contrast[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 681-684.  
罗华,张元.基于测量最小可分辨对比度的 CCD 相机成像质量的评价[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3):681-684.
- [19] JIN Wei-qi, GAO Shao-shu, WANG Ji-hui, et al. A model to predict range performance of imaging system for extended target based on minimum resolvable contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1552-1556.  
金伟其,高绍姝,王吉晖,等.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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6):1552-1556.
- [20] 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.