

文章编号: 1002-2082 (2020) 06-1241-06

## 基于三代微光 ICCD 成像装置的目标 对比度影响因素测试分析

陈旭浪<sup>1,2</sup>, 党小刚<sup>1,2</sup>, 郭欣达<sup>3</sup>, 王磊<sup>1,2</sup>, 张姝丽<sup>2</sup>, 拜晓锋<sup>1,2</sup>,  
韩坤<sup>1,2</sup>, 袁渊<sup>1,2</sup>, 李军国<sup>1,2</sup>, 成伟<sup>1,2</sup>

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安, 710065; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;  
3. 空军装备部驻昆明地区军代表室, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 微光夜视整机可以在夜间光照条件较差的情况下, 对目标实施有效观察, 而夜间观察目标对比度是整机作用距离影响因素中的重要指标。为满足微光夜视整机夜间观察理论分析及试验对目标对比度数据的迫切需求, 基于三代微光像增强器具有与星光条件下自然光辐射光谱良好匹配的使用特性, 搭建了基于三代微光 ICCD 的成像装置。并从微光成像系统的能量传递链及光电子成像系统的视觉特征方程分别推导环境光照度和目标-背景反射率比与对比度关系。在暗室和夜天光条件下开展了对比度试验, 试验结果证明, 当照度处于三代微光像增强器照度-亮度的线性相关照度区间  $[E_s, E_m]$  时, 对比度与照度无关; 对同一目标及背景采集图像, 目标-背景反射率越接近 1, 对比度越小。

**关键词:** 微光; ICCD; 对比度; 像增强器

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0603004

### Test and analysis of factors influencing target contrast ratio based on 3<sup>rd</sup> generation LLL ICCD imaging device

CHEN Xulang<sup>1,2</sup>, DANG Xiaogang<sup>1,2</sup>, GUO Xinda<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuli<sup>2</sup>, BAI Xiaofeng<sup>1,2</sup>,  
HAN Kun<sup>1,2</sup>, YUAN Yuan<sup>1,2</sup>, LI Junguo<sup>1,2</sup>, CHENG Wei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Low-Level-Light Night Vision, Xi'an 710065, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

3. Military Representative Office of Air Force Equipment Division in Kunming, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The low-level-light (LLL) night vision machine can effectively observe the target under the poor illumination conditions at night, and the target contrast observed at night is an important indicator of the influence factors of the whole operating distance. In order to meet the urgent need of target contrast data for night observation theoretical analysis and test of LLL night vision machine. Based on the use characteristics of the 3<sup>rd</sup> generation LLL image intensifier with good matching with the natural light radiation spectrum under starlight conditions, an imaging device based on the 3<sup>rd</sup> generation LLL ICCD is built. From the energy transfer chain of LLL imaging system and the visual characteristic equation of optoelectronic imaging system, the relationship between the ambient illumination, with the target-background reflectance ratio and the contrast is deduced respectively. The contrast test was carried out in dark room and natural night conditions. The test results show that when the illuminance is in the linear correlation illuminance interval  $[E_s, E_m]$  of the third generation LLL image intensifier, the contrast has nothing to do with the illuminance; for the same target and background, the target-background reflectance is closer to 1, the lower the contrast is.

**Key words:** low-level-light; ICCD; contrast ratio; image intensifier

收稿日期: 2020-05-09; 修回日期: 2020-09-25

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金 (BQJJ-2018-004)

作者简介: 陈旭浪 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事微光器件性能测试评价和应用技术方面的研究。E-mail: XuLang\_Chen@126.com

## 引言

作用距离是评价微光夜视整机系统的一个重要指标<sup>[1]</sup>。微光夜视整机夜间作用距离与目标对比度、环境温湿度、能见度、环境光照度等参数密切相关,而在这些因素中目标对比度对作用距离评估的影响最为突出<sup>[1-2]</sup>。国外对微光夜视成像的相关文献是封锁的,国内目标对比度方面的研究工作主要聚焦于系统的信噪比<sup>[3]</sup>、图像处理算法<sup>[4-5]</sup>等方面。Orlando、李文娟、罗华、金伟其等在光电成像系统性能评价方向就 MRC(minimum resolvable contrast)开展了较多的研究工作<sup>[6-9]</sup>。此外,2004年,王毅等开展了大气中目标背景对比度及其影响因素的数值分析<sup>[10]</sup>,但未进行微光目标对比度影响因素研究。2010年,杜石明等进行了红外光照射对目标与背景对比度影响研究<sup>[11]</sup>,未对微光条件下可见光区间进行研究。

目标对比度的测量通过观察物体时物体和背景的亮度差异而实现<sup>[3]</sup>。在夜天光条件下开展微光夜视仪试验时,自然光辐射光谱强度会随着光照的降低而发生较大变化<sup>[12]</sup>。由于三代微光像增强器具有与星光条件下自然光辐射光谱良好匹配的使用特性<sup>[13-14]</sup>,建立了基于三代微光 ICCD 成像装置。为了探究环境光照度、目标反射率、背景反射率对目标对比度测量的影响,从微光成像系统能量传递链、光电子成像系统视觉特征方程出发,分别推导环境光照度和目标-背景反射率比与对比度的关系。并以三代微光 ICCD 成像装置为基础,开展了暗室和夜天光环境下的对比度测试试验。本研究工作对开展夜间对比度测试及微光夜视仪试验具有重要意义。

## 1 理论分析

### 1.1 对比度的计算

利用 ICCD 采集夜间低照度环境下的目标景物图像,然后利用图像分析软件分别提取目标物的灰度值  $I_k$  和目标周边背景的灰度值  $I_0$ 。由于图像灰度值与像面照度线性相关,因此利用公式计算得到目标对比度<sup>[2]</sup>:

$$CON = \left| \frac{L_k - L_0}{L_k + L_0} \right| = \left| \frac{I_k - I_0}{I_k + I_0} \right| \quad (1)$$

式中:  $CON$  为目标对比度;  $L_k$ 、 $L_0$  分别表示目标亮度和背景光亮度;  $I_k$ 、 $I_0$  分别表示目标物灰度值和周边背景灰度值。

### 1.2 系统能量传递链评价

ICCD 成像系统检测目标各点的亮度分布基于像面上所获得的照度获得:

$$L_e = \frac{\rho_a}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 E_0 \tau G(E_0) \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{\rho_0}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 E_0 \tau G(E_0) \quad (3)$$

(2)式和(3)式中:  $E_0$  为环境照度;  $L_e$  为目标像面亮度;  $L_0$  为背景像面亮度;  $\rho_a$  为目标光反射率;  $\rho_0$  为背景光反射率;  $(D/f)$  为相对孔径;  $\tau$  为大气及物镜透射率; 像增强器的亮度增益  $G$  是以环境照度  $E_0$  为自变量的函数。将(2)式和(3)式代入(1)式得:

$$CON = \left| \frac{\frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \rho_a \tau G(E_0) - \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \rho_0 \tau G(E_0)}{\frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \rho_a \tau G(E_0) + \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \rho_0 \tau G(E_0)} \right| = \left| \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a + \rho_0} G(E_0) \right| \quad (4)$$

由于三代微光像增强器自动亮度控制 (automatic brightness control, ABC),  $1 \times 10^{-3} \text{ lx} \sim 5 \times 10^{-2} \text{ lx}$  照度区间内,像增强器的荧光屏亮度与环境照度  $E_0$  线性相关<sup>[15]</sup>,即像增强器亮度增益  $G$  为定值。当  $G$  值恒定时,  $CON$  与环境光照度无关。

### 1.3 光电子成像系统视觉特征方程

在照度-亮度的线性相关照度区间  $[E_s, E_m]$  内,三代像增强器的亮度增益  $G$  为定值。根据光子数统计涨落之规律,对于面元  $A$  的光照度为  $E_0$ ,其反射特性服从郎伯分布,则反射光强度分别为

$$I_a = \sigma \rho_a E_0 \Delta x \Delta y / \pi \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  为每流明光通量所包含的每秒光子数目,对色温  $T_c = 2856 \text{ K}$ ,  $\sigma \approx 1.6 \cdot 10^{16} \text{ 光子数/lm} \cdot \text{s}$ ;  $\rho_a$  为面元  $A$  的光反射率;  $\Delta x$  和  $\Delta y$  是面元尺寸。

通过大气和系统物镜后,输入到光电子成像器件光敏面  $A'$  的光子数通量  $n_a$  为:

$$n_a = \sigma \rho_a D^2 E_0 \Delta x \Delta y \tau / 4r^2 \quad (6)$$

式中:  $D$  为物镜口径;  $r$  为观察距离;  $\tau$  为物镜及大气的总透过率。若背景光照度引起的光子数通量为  $n_0$ ,背景光反射率为  $\rho_0$ ,则对比度为

$$CON = \left| \frac{n_a - n_0}{n_a + n_0} \right| = \left| \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a + \rho_0} \right| = \left| \frac{\rho_a / \rho_0 - 1}{\rho_a / \rho_0 + 1} \right| \quad (7)$$

则  $CON$  与目标光反射率  $\rho_a$  与背景光反射率

$\rho_0$  之比越接近 1, 对比度越小。

## 2 试验装置及方法

本文基于三代微光 ICCD 成像装置, 开展了不同对比度靶标的暗室对比度测试与夜天光对比度测试。

### 2.1 不同对比度靶标的暗室测试

暗室对比度测试时<sup>[16-19]</sup>, ICCD 成像镜头为康标达 F 1.4/50 标准镜头; 照度计为 KLL-04 型宽量程照度测试仪, 量程可覆盖  $10^{-7}$  lx~ $10^3$  lx; 积分球光源可提供  $10^{-5}$  lx~ $10^2$  lx 的照度。

暗室对比度测试原理图如图 1 所示。照度计与靶标设置在一侧, 积分球与 ICCD 距离靶标为 5 m。

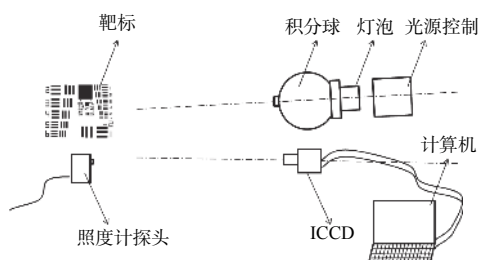


图 1 对比度测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of contrast test

测试具体步骤为:

1) 通过积分球光源实现暗室照度的调节; 调节环境光照度分别为  $7.5 \times 10^{-2}$  lx、 $4 \times 10^{-2}$  lx、 $1 \times 10^{-2}$  lx、 $7.5 \times 10^{-3}$  lx、 $4 \times 10^{-3}$  lx、 $1 \times 10^{-3}$  lx;

2) 照度计测量暗室光照度并记录;

3) 使用 ICCD 在 2) 测得的各光照度下, 使用 ICCD 采集分别采集靶标图像, 在计算机上通过灰度值计算得到靶标的对比度;

4) 更换靶标后重复以上步骤。

### 2.2 夜天光对比度测试

夜天光对比度测试时, 需要携带 ICCD 成像装置 (镜头为康标达 F 1.4/50)、KLL-04 型宽量程照度测试仪、便携计算机、蓄电池, 以及必要的场地标定设备。试验场地按照 GJB4396-2002 微光夜视仪定型试验规程选定。如图 2 所示, 试验时设置目标位与观察位, 目标位站立两位分别身着沙漠迷彩与丛林迷彩的试验人员, 在观察位处, 使用 ICCD 成像装置进行图像采集。

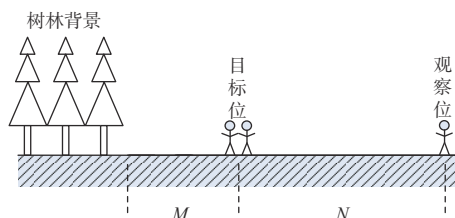


图 2 试验场地情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test site

试验具体步骤为:

1) 测试时, 目标位占高不小于背景高度的 1/4, 在距离目标  $N$  为 50 m、100 m 及 150 m 处进行图像采集。

2) 用照度计监测自然光照度并记录;

3) 以着丛林迷彩人员和着沙漠迷彩人员为目标, 用 ICCD 测试装置观察目标并调焦至图像清晰后, 在距离目标、背景距离  $M$  为 50 m、100 m 及 150 m 处分别进行图像采集 (分别采集 25 帧)。

4) 在完成 3) 的图像采集后, 经计算后给出对比度结果。

5) 更换试验场地重复以上步骤。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同对比度靶标的暗室测试结果及分析

对 10 组不同对比度靶标进行 ICCD 图像采集并计算, 得到的对比度测试结果如表 1 所示。

表 1 对不同对比度靶标的对比度测试数据

Table 1 Contrast test data for different contrast targets

靶标	标准对比度	照度/lx						%
		$7.5 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$7.5 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$	
1#	83.1	59	60	61	61	62	61	
2#	82.6	53	59	61	60	61	59	
3#	76.2	42	48	47	48	47	47	
4#	65.7	33	40	41	40	39	39	
5#	48.8	24	29	29	29	29	29	
6#	34.5	18	19	19	18	17	17	
7#	24.8	11	13	13	13	12	12	
8#	20.4	11	13	13	13	11	11	
9#	16.8	9	9	10	11	10	10	
10#	11.0	4	6	6	6	5	5	

由于光电子成像系统各环节逐级传递的衰减存在, ICCD测得的对比度低于实际靶标对比度。由图3暗室对比度测试结果知, 在暗室条件下, 不同靶标在不同照度下的测试值与标准对比度对比下降趋势基本一致。验证了成像装置进行对比度测量的有效性。

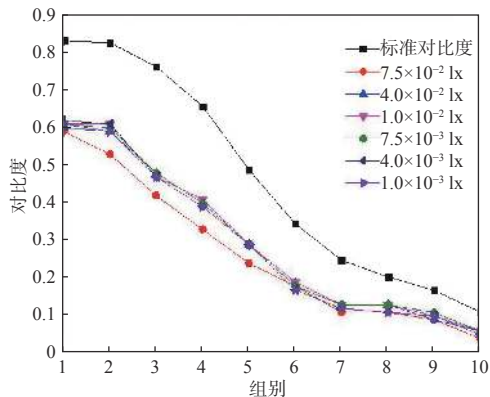


图3 暗室对比度测试结果

Fig. 3 Dark room contrast test results

图4为对比度-照度曲线, 由图中可知, 对比度与环境照度几乎不相关。从1#靶标到10#靶标, 它们的区别在于黑白条纹中黑色条纹的颜色深浅程度不同。白色、黄色等明亮颜色可以反射光线, 黑色、紫红色等较深颜色可以吸收光线。黑色线条颜色越深反射率越小。因此, 1#靶标到10#靶标对比度的降低可以看做是黑条纹反射率的增加, 即黑条纹反射率接近白条纹反射率, 他们的比值接近于1。从图4中可以看出, 随着靶标从1#更换到10#, 黑条纹与白条纹反射率的比值增加, 对比度降低。以上试验结果与1.3节分析一致。

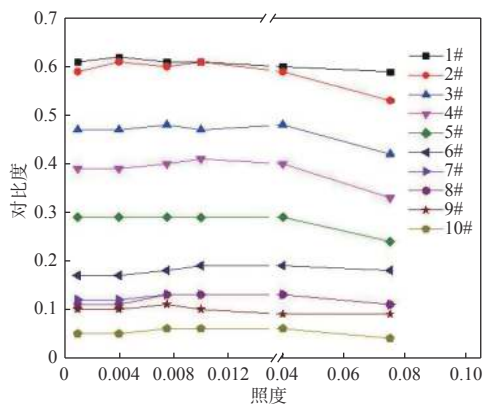


图4 对比度-照度曲线

Fig. 4 Curves of contrast to illuminance

图5为三代微光像增强器ABC曲线。当入射照度低于 $E_s$ 时, 由于系统的增益不够, 荧光屏输出亮度会很小, 这不利于微光像增强器的成像探测; 当入射照度处于 $[E_s, E_m]$ 之间, 近似地认为像增强器处于线性工作状态, 这时的系统增益基本上是一个稳定的值; 而当入射照度大于 $E_m$ 时, 输出亮度就会饱和。

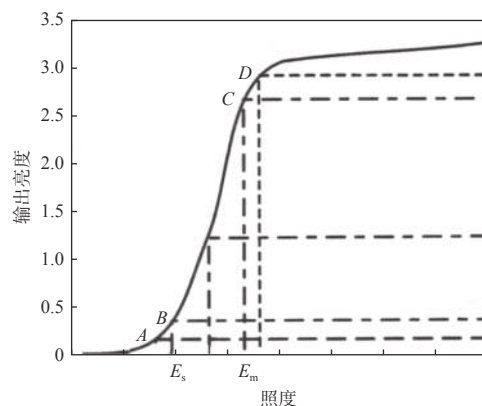


图5 三代微光像增强器的ABC曲线

Fig. 5 ABC curves of 3<sup>rd</sup> LLL image intensifier

由三代微光像增强器自动亮度控制可知, 在 $[1 \times 10^{-3} \text{ lx}, 5 \times 10^{-2} \text{ lx}]$ 照度区间内, 像增强器的荧光屏亮度与环境照度 $E_0$ 线性相关, 即像增强器亮度增益 $G$ 为定值。照度在 $[1 \times 10^{-3} \text{ lx}, 5 \times 10^{-2} \text{ lx}]$ 内对同一靶标测试时, 目标与背景反射率不变, 对比度基本一致。当照度 $>5 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 时, 此时 $G$ 是以 $E_0$ 为自变量的函数,  $7.5 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 时的三代像增强器的增益略有下降, 导致对比度的下降, 不同靶标的对比度都低于其他照度下的测试结果。以上分析结果与1.2节分析一致。

### 3.2 夜天光对比度测试结果与分析

表2为夜天光对比度测试结果。一般来讲, 夜间夜视仪仿真环境中树林的反射率为10%~40%, 水泥路的反射率为20%~50%, 土坡反射率为20%~60%, 沙漠迷彩的反射率为30%~60%, 丛林迷彩的反射率为20%~40%。以树林为背景时, 沙漠迷彩-树林的反射率差别高于丛林迷彩-树林反射率差别, 因此对比度测试结果为沙漠迷彩高于丛林迷彩; 以水泥路为背景时, 沙漠迷彩-水泥路的反射率差别低于丛林迷彩-水泥路反射率差别, 因此对比度测试结果为沙漠迷彩低于丛林迷彩; 以土坡为背景时, 也能够得到相同的规律; 以上试验结果与1.3节分析一致。



表 2 不同距离、不同背景的对比度测量数据

Table 2 Contrast measurement data under different distances and backgrounds

%

目标背景	沙漠迷彩	丛林迷彩	沙漠迷彩	丛林迷彩	沙漠迷彩	丛林迷彩
	50 m		100 m		150 m	
树林( $1.2 \times 10^{-3}$ lx)	11.6	8.6	11.2	8.4	10	8.1
水泥路( $3.5 \times 10^{-3}$ lx)	13.2	20.4	13.5	19.5	9.5	12.0
土坡( $2.8 \times 10^{-3}$ lx)	3.4	5.5	3.1	4.9	3.4	5.1

以目标与背景反射率比为自变量,仿真理论分析 1.3 节中的(7)式的函数曲线。图 6 为目标与背景反射率比-对比度曲线。从图中可知,当目标-背景的反射率比值为 1 时,对比度的测量值为 0。即当背景不变时,目标与背景反射率差别越大,对比度越高;两者越接近,对比度越低。

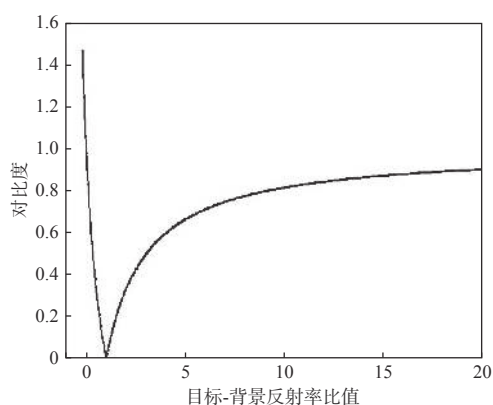


图 6 目标与背景反射率比-对比度曲线

Fig. 6 Curves of target and background reflectivity to contrast

## 4 结论

本文根据微光成像系统能量传递链、光电子成像系统视觉特征方程分别推导环境光照度和目标-背景反射率比与对比度的理论公式;建立了基于三代微光像增强器 ICCD 的成像装置,通过不同靶标的对比度暗室测量试验,验证了基于 ICCD 成像装置开展对比度试验的有效性。为夜天光环境下的微光夜视仪整机试验的对比度测量提供了一种技术手段。试验结果表明,在三代微光像增强器自动亮度控制的照度-亮度增益线性区间内,以环境光照度单一变量时,对比度与其不相关;在照度-亮度增益线性区间内外,对比度-环境照度的关系与荧光屏亮度-环境照度类似。对于同一目标,目标-背景的反射率之比越接近 1,测量对比度越

小。本文中未对大气透射、镜头相对孔径等对比度相关因素进行分析讨论。在夜天光对比度试验中,对于同一目标与背景,对比度随目标-背景距离的增加而减小,其原因可能是距离变大增加了 ICCD 采集得到图像的能量损失,增加了测量的误差。由于数据点较少,因此不能得到对比度与目标-背景距离的关系。

## 参考文献:

- [1] LIU Song, JIN Weiqi, LI Li, et al. Minimum resolvable contrast measurement of low illumination imaging module and simulation of its range[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 118-125.  
刘松, 金伟其, 李力, 等. 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[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 118-125.
- [2] 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.
- [3] LI Zhihong, LEI Meirong, ZHOU Xueyan, et al. Measurement and experimental correction of target and background contrast based on CCD[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 31(1): 22-24, 21.  
李志宏, 雷美容, 周学艳, 等. 基于 CCD 的目标与背景对比度测量与实验校正[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 22-24, 21.
- [4] YANG Shuning, BAI Xiaofeng, HE Yingping, et al. The research of low-light-level image intensifier of SNR calibrate test resolution[J]. Infrared Technology, 2018, 40(10): 1019-1022.  
杨书宁, 拜晓锋, 贺英萍, 等. 微光像增强器信噪比校正测试方法研究[J]. 红外技术, 2018, 40(10): 1019-1022.

- [5] MURRAY H. Multiscale image contrast amplification (MUSICA)[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1994, 2167: 551-560.
- [6] ZHANG Yatao, JI Shupeng, WANG Qiangfeng, et al. Definition evaluation algorithm based on regional contrast[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 293-299.  
张亚涛, 吉书鹏, 王强锋, 等. 基于区域对比度的图像清晰度评价算法[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 293-299.
- [7] ORLANDO H J, PAPPAS M L, LOPEZ M A. Automated minimum resolvable contrast (AMRC) test: US, EP0864231A1 [P/OL]. 1998-09-16[2020-05-26]. <https://patents.google.com/patent/EP0864231A1>.
- [8] LI Wenjuan, ZHANG Yuan, DAI Jingmin, et al. Study on the measurement techniques of MRC in visible imaging system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006(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(1): 32-35.
- [9] LUO Hua, ZHANG Yuan. Evaluation of imaging quality of ccd cameras by measuring minimum resolvable contrast[J]. Acta Optica 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.
- [10] WANG Yi, FAN Wei, RAO Ruizhong. Analysis on the object-background contrast by numerical radiative transfer computation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(7): 848-852.  
王毅, 范伟, 饶瑞中. 大气中目标背景对比度及其影响因素的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(7): 848-852.
- [11] DU Shiming, ZENG Kai, LYU Xiangyin, et al. Target and its background contrast under infrared illumination[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(5): 838-842.  
杜石明, 曾凯, 吕相银, 等. 红外光照射对目标与背景对比度影响研究[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 838-842.
- [12] XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photo-electronic imaging devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.  
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.
- [13] BAI X F, CHEN X L, SHI F, et al. Measurement method of contrast of observation target based on image enhancement technology under starlight conditions[C]//Proceedings of SPIE Conference. Beijing: SPIE, 2019.
- [14] BAI Xiaofeng, YANG Shuning, HOU Zhipeng, et al. NVIS compatible characteristic of low light level image intensifier assembly[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S2): 106-110.  
拜晓锋, 杨书宁, 侯志鹏, 等. 微光像增强器夜视兼容特性分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S2): 106-110.
- [15] BAI Xiaofeng, SU Junhong, SHI Feng, et al. Illumination effect on MTF of 3rd generation low-light-level image intensifier[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(2): 297-300.  
拜晓锋, 苏俊宏, 石峰, 等. 照度对测量三代微光像增强器MTF的影响分析[J]. 应用光学, 2010, 31(2): 297-300.
- [16] TIAN Yuan. Researching on the testing method of CCD picture contrast[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2008.  
田园. CCD图像对比度测试方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- [17] YU Hao. Researching on the correction method of the contrast measuring using CCD cameras[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.  
于浩. CCD相机测量对比度的校正方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [18] PANG Changfu, LIU Liudi. Problems and solutions of CCD camera in measurement[J]. Optical Technique, 1996, 22(2): 5-8.  
庞长富, 刘榴娣. CCD摄像机用于测量中存在的问题及解决方法[J]. 光学技术, 1996, 22(2): 5-8.
- [19] ZHU Junchao, LIU Tiegeng, LIU Derui, et al. Linear CCD gray-scale distribution real-time calibration method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(12): 108-112.  
朱均超, 刘铁根, 刘德瑞, 等. 一种线阵CCD图像灰度分布快速校正方法[J]. 光电工程, 2007, 34(12): 108-112.