

# 亮度增益对基于像增强器的目标背景对比度影响

苏悦<sup>1</sup>, 拜晓锋<sup>1,2</sup>, 党小刚<sup>1,2</sup>, 冯丹青<sup>1,2</sup>, 程宏昌<sup>1,2</sup>, 李周奎<sup>1,2</sup>, 韩坤<sup>1,2</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明, 650223; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 亮度增益为微光像增强器的重要参数, 影响微光夜视环境下以微光像增强器为核心的目标背景对比度测试结果精度。本文基于对比度测试原理, 通过对不同亮度增益的 ICCD 进行目标背景对比度测试, 分析得到亮度增益与目标背景对比度的变化关系及影响因素。测试结果表明: 亮度增益分别为 12000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、8300 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx) 时, 环境照度在 [2×10<sup>-3</sup>, 8×10<sup>-3</sup>] (lx) 区间内, 目标背景对比度受亮度增益影响较小。照度在区间外时, 受亮度增益影响, 目标背景对比度测试结果可能失真。本文研究结果为提高 ICCD 目标背景对比度测试精度提供数据支持。

**关键词:** 像增强器; ICCD; 目标背景对比度; 亮度增益

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)04-0383-06

## Influence of Brightness Gain on the Object-Background Contrast of an Image Intensifier

SU Yue<sup>1</sup>, BAI Xiaofeng<sup>1,2</sup>, DANG Xiaogang<sup>1,2</sup>, FENG Danqing<sup>1,2</sup>, CHENG Hongchang<sup>1,2</sup>,

LI Zhoukui<sup>1,2</sup>, HAN Kun<sup>1,2</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Brightness gain is an important parameter of low-light image intensifiers. It affects the accuracy of the object-background contrast in low-light night vision environments. Based on the principle of contrast tests, this study analyzes the relationship between the brightness gain and the object-background contrast, as well as influencing factors, via the object-background contrast test on an ICCD with different brightness gains. The results show that when the brightness gain is 12000, 8300, or 6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx) and the ambient illuminance is within the range of [2×10<sup>-3</sup>, 8×10<sup>-3</sup>] (lx), the object-background contrast is minimally affected by the brightness gain. However, when the illuminance is outside this range, the object-background contrast test result may be distorted due to the influence of the brightness gain. The results of this study can guide the improvement of accuracy of ICCD object-background contrast tests.

**Key words:** image intensifier, ICCD, object-background contrast, brightness gain

## 0 引言

目前针对强光照条件下目标背景对比度的研究较为广泛。然而, 已有研究表明, 随着环境照度的降低, 若光照的色温条件发生变化<sup>[1]</sup>, 则其目标背景对比度也会发生变化, 因此强光照条件下的目标背景对比度不再适用, 或者说会产生较大偏差, 而关于夜间目标背景对比度对视距的影响研究却鲜有报道。对于微光夜视系统而言, 其典型应用环境多为

星光条件, 即 10<sup>-3</sup> lx 环境。像增强器在微光领域对图像信息倍增作用被广泛使用, 所以采取用微光像增强器和 CCD 通过光纤光锥或透镜进行耦合<sup>[2]</sup>, 利用像增强器的微光下的增强性能, 使得 CCD 在低照度环境下工作, 并且可以输出稳定图像。

本文利用微光像增强器的高亮度增益放大特性, 对星光条件下的目标背景对比度进行测量及验证。针对像增强器亮度增益特性表现出在一定范围内输入照度和输出亮度为线性变化的现象, 对线性变化范围

收稿日期: 2021-12-21; 修订日期: 2022-01-11.

作者简介: 苏悦 (1996-), 女, 陕西人, 硕士研究生, 微光器件性能测试。

通信作者: 拜晓锋 (1982-), 男, 陕西人, 博士, 研高工, 长期从事微光器件性能测试评价和应用技术研究。E-mail: baixiaofeng2001@163.com.

内不同亮度增益下的照度-灰度关系以及照度-目标背景对比度关系进行研究。由此对亮度增益在微光环境下以微光像增强器为核心的目标背景对比度的影响展开讨论。满足微光夜视整机视距评估时对夜间星光环境下基于国产三代 ICCD 的目标背景对比度特性的准确测量需求。

## 1 测试原理和方法

### 1.1 测试原理

由微光环境下物体辐射光传递过程,利用目标对比度理论公式,以国产 ICCD 作为测试器件,建立 ICCD 目标对比度测试数学模型,图 1 所示为微光环境对比度测试示意图<sup>[3-4]</sup>。

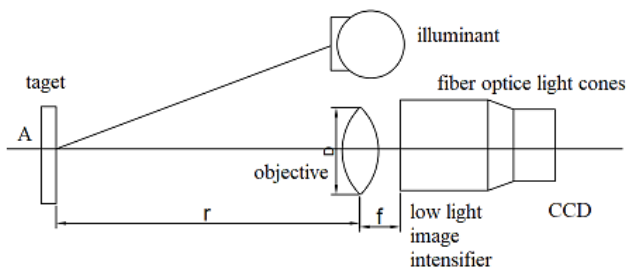


图 1 对比度测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of contrast test

利用灰度反应目标与背景调制对比度的公式为<sup>[5]</sup>:

$$C = \frac{L_M - L_B}{L_M + L_B} = \frac{g_M - g_B}{g_M + g_B} \quad (1)$$

式中:  $L_M$  为探测环境的目标亮度值;  $L_B$  为探测目标的亮度值;  $g_B$  为探测环境的背景灰度值;  $g_M$  为探测目标的灰度值;  $C$  为调制对比度。

测试系统中的光信息传递分为 3 个主要过程:一是光源光束在目标处反射并入射到探测仪器中;二是在 ICCD 中通过像增强器光放大;三是通过耦合的 CCD 器件将光信号转化为灰度信息。

第一个传输过程主要影响因素为在光传播过程中大气的衰减损耗以及物镜的衰减损耗  $\tau_{obj}$ ,光源在物体表面发生反射,反射光成像到像增强器输入面上。光谱反射率  $\rho$  表征物体的颜色信息,表现了颜色材质特征,是物体的固有属性,目标探测时只与物体本身的相关,无关于环境照度<sup>[6]</sup>。目标和背景的光谱反射率不同形成差异。经过物镜成像,反射光信息成像到像增强器输入面上的辐射照度为<sup>[3]</sup>:

$$E_K = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \tau_{obj} L_A \quad (2)$$

式中:  $E_K$  为目标反射光到达物镜表面的辐射照度;  $D$  为物镜孔径大小;  $f$  为物镜的焦距;  $L_A$  为目标反射光

到达物镜表面的辐射亮度。

第二个传输过程中,光信息在 ICCD 中通过像增强器光放大。如图 2 所示,三代微光像增强器 ABC 曲线在最大输出亮度  $E_m$  (点 D 所对应位置) 和最小输出亮度  $E_s$  (图 2 点 A 所对应位置) 区间内表现出近似线性变化,即亮度增益为定值。C 点 (B 点) 处于线性区域内,由于接近上限点 D (下限点 A),输出信号出现上限饱和 (下限截断) 的现象<sup>[3]</sup>。当输入照度大于最大输出照度或小于最小输出照度时呈现出非线性变化。线性区间内亮度增益表达式为:

$$G = \frac{L_A}{E_K} \quad (3)$$

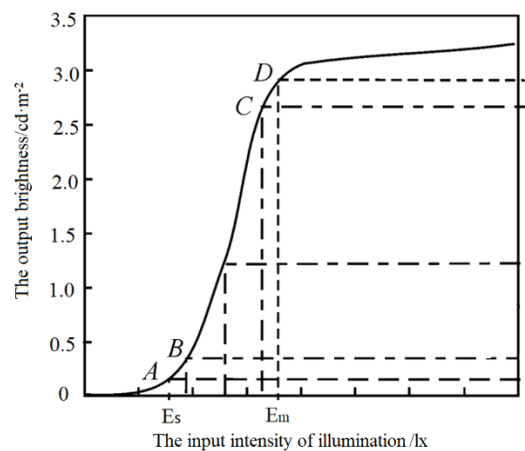


图 2 三代微光像增强器的 ABC 曲线

Fig.2 ABC curve of the third generation low light level image intensifier

第三个传输过程中,通过耦合的 CCD 器件将光信号转化为灰度信息。像增强器输出辐射亮度为光锥输入辐射亮度。考虑光纤光锥耦合对光信息带来的损耗以及 CCD 工作时的光-电-光变化过程,光纤光锥的有效透过率  $T$  为下式<sup>[7-9]</sup>:

$$T = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} = \left(\frac{D_{small}}{D_{large}}\right)^2 T_R T_A K_C \quad (4)$$

式中:  $\Phi_{out}$  光纤光锥小端面输出的光通量;  $\Phi_{in}$  为光纤光锥大端面的输入辐射通量;  $D_{small}$  光纤光锥小端面直径;  $D_{large}$  光纤光锥大端面直径;  $T_A$  光纤光锥材料的透过率;  $T_R$  光锥光纤反射损耗后的透过率;  $K_C$  为填充效率。

CCD 接收光纤光锥输出光信息,将光信息转换为灰度图像,整个输出图像的灰度分布,是由数个单个像素共同组成的。每个像素接收到的辐射照度  $E_e$  为:

$$E_e = \frac{\Phi_{out} s \tau_{粘合剂}}{S_{光敏面}} \quad (5)$$

式中:  $s_{\text{光敏面}}$  为光敏面面积;  $\tau_{\text{粘合剂}}$  为粘合剂损耗;  $s$  为像素面积。

根据电荷转移原理, 可以得到单个像素的电荷量  $Q$  为式(6):

$$Q = \frac{\eta es}{hv} \int E_e dt \quad (6)$$

式中:  $\eta$  为光电转换效率;  $e$  为电子电荷量 ( $1e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ );  $h$  为普朗克常数 ( $h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ );  $\nu$  为辐射电磁波的频率。

综合前文讨论光学传递链的影响因素得到输出图像上对应的灰度值为:

$$C = \begin{cases} \left| \frac{\frac{\eta[m,n]s^2[m,n]}{\nu_m} \rho_M - \frac{\eta[u,v]s^2[u,v]}{\nu_m} \rho_B}{\frac{\eta[m,n]s^2[m,n]}{\nu_M} \rho_M + \frac{\eta[u,v]s^2[u,v]}{\nu_B} \rho_B + 2o + 2\sigma} \right| & E_S < E < E_m \\ \left| \frac{\frac{\eta[m,n]s^2[m,n]}{\nu_M} G(E_M) \rho_M - \frac{\eta[u,v]s^2[u,v]}{\nu_B} G(E_B) \rho_B}{\frac{\eta[m,n]s^2[m,n]}{\nu_M} G(E_M) \rho_M + \frac{\eta[u,v]s^2[u,v]}{\nu_B} G(E_B) \rho_B + 2o + 2\sigma} \right| & E < E_S \text{ 或 } E > E_m \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\rho_M$  为目标的光谱反射率;  $\rho_B$  为背景的光谱反射率;  $\nu_M$  为目标辐射电磁波频率;  $\nu_B$  为背景辐射电磁波频率;  $E_M$  为目标的输入照度;  $E_B$  为背景的输入照度; 亮度增益  $G$  在非线性变化区间表现为以输入照度为自变量的函数。

式(9)中可以看出, 当照度在线性变化区间 ( $E_S < E < E_m$ ) 内时, 对比度变化不受亮度增益影响, 当照度大于像增强器的最大输入照度或低于最小输入照度时, 对比度变化与亮度增益有关。

### 1.2 测试方法

目标对比度测试系统中, 主要采用高信噪比、高分辨率的 CCD 相机、国产三代微光像增强器、光纤光锥、照度计、经过标定的靶板以及计算机等。光源采用 2856 K 卤钨灯来模拟夜天光环境; 选用照度范围可覆盖  $1 \times 10^{-1} \text{ lx} \sim 1 \times 10^{-4} \text{ lx}$  范围的宽量程微弱光照度计进行测试; 靶标 1#、2#、3#、4#、5# 采用对比度依次为 100%、90%、75%、60% 以及 45%; ICCD 器件选用国产三代像增强器以及光纤光锥作为连接 CCD 与像增强器的中继元件; 日本 KOWA 公司生产的物镜, 焦距值  $f$  为 50 mm, F 数为 1.4。

在实验室中, 该系统选用的三代像增强器亮度增益设置分别为  $12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 、 $8300 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 、 $6000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ , 在暗室环境进行目标背景对比度测试, 对比度测试系统的示意图如图 3 所示。

$$g = Q + o + \sigma \quad (7)$$

式中:  $o$  为输出过程中的直流偏置;  $\sigma$  为输出过程中存在的随机噪声<sup>[10-11]</sup>。

由于 CCD 的像素不均匀性, 每一个像素的灰度响应、光电转换效率和像素面积不尽相同。CCD 上任意位置  $(i, j)$  处灰度值可表示为:

$$g[i, j] = \frac{\eta[i, j] es^2[i, j]}{hv} E_e t + o + \sigma \quad (8)$$

当选取目标位置为  $(m, n)$ , 背景位置为  $(u, v)$  时, 对比度可表示为下式:

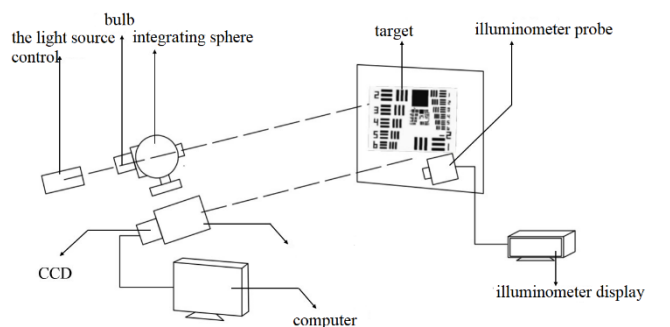


图 3 对比度测试系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of contrast test system

## 2 实验结果及分析

由式(1)所示, 实际测试中图像的对比度由目标灰度与背景灰度计算所得, 通过光学信息传递所接收到灰度图像。以亮度增益为  $12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  条件为例, 可以看出对于相同靶标在不同灰度时, 靶标上的黑白条纹的灰度值均表现为随着照度的增加而递增, 图 4 为照度和灰度对应图线。从图 4 可以看出, 当照度大于一定值时, 照度-目标灰度呈现非线性变化关系, 根据这种现象对  $G = 12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  进行线性区间拟合。

其中, 线性拟合的程度由决定系数  $R^2$  决定, 系数越接近 1, 则线性度越好。如图 5(a)所示为  $G = 12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  的线性拟合结果, 当照度区间为  $[0.002,$

0.008] (单位: lx) 变化区间时, 线性拟合的决定系数  $R^2$  大于 0.9273, 具有良好的拟合程度, 因此认为线性关系可信。以同样方法对  $G=8300 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  进行线性拟合, 拟合结果如图 5(b) 所示, 当照度区间为 [0.002, 0.008] (lx) 变化区间时, 决定系数大于 0.9306; 当  $G=6000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  进行线性拟合, 拟合结果如图 5(c) 所示, 当照度区间为  $[1.8 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-2}]$  (lx) 变化区间时, 决定系数大于 0.9244。

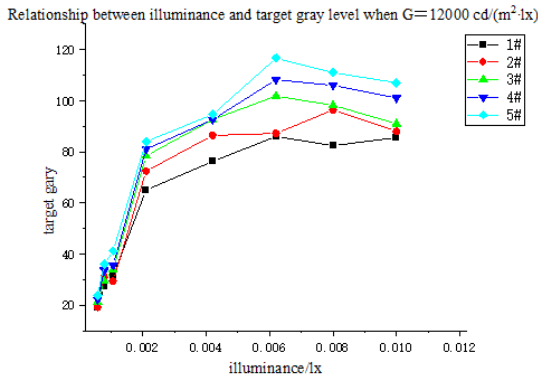


图4  $G=12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  时照度与目标灰度的关系

Fig.4 Relationship between illuminance and target gray level when  $G=12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$

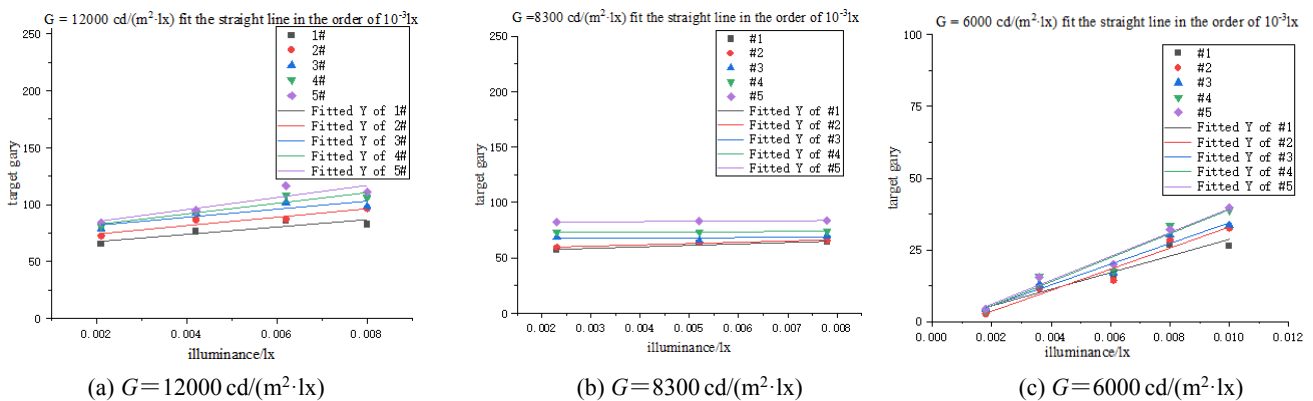
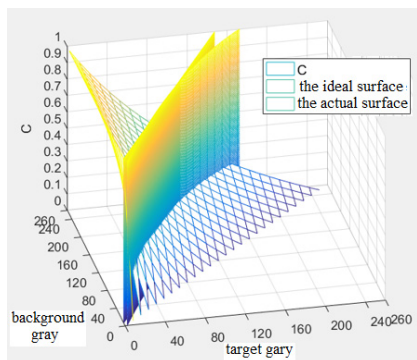


图5 照度-目标灰度在  $10^{-3} \text{ lx}$  量级拟合直线  
Fig.5 Illuminance-target gray fitted line in the order of  $10^{-3} \text{ lx}$

像增强器与 CCD 作为 ICCD 主要组成部分, 非线性变化出现原因有主要由两方面: 像增强器的输出亮度非线性区间以及 CCD 的动态范围。其一, 对于像增强器输入照度达到最大输入照度值后, 空间上出现电荷量饱和, 并且由于荧光屏发光能力的有限性和光电阴极疲劳的原因造成像增强器的输入照度-输出亮度之间的非线性变化<sup>[12]</sup>, 此时, 由光电阴极输入照度和荧光屏输出亮度表征的亮度增益公式无法适用<sup>[13]</sup>。其二, 像素大小以及噪声影响决定了 CCD 的动态范围, 表现在输出图像灰度和照度之间的非线性变化关系。在对比度计算中, 灰度的非线性变化影响对比度变化。

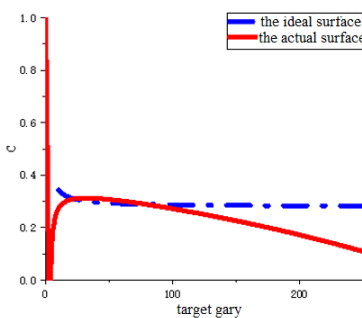
建立目标背景对比度数学模型如图 6(a) 所示, 平面投影如图 6(b) 所示, 可以看出, 在照度-灰度所对应的线性区间内, 对比度的实际变化量与理想变化量接近。当照度值过低时, 对比度出现阶跃变化; 当照度值过高时, 对比度曲线偏离理想变化曲线。因此对于实际测试中, 输入照度过低和过高时, 目标对比度均不能正确表征图像的对比度信息。

图 7 中 (a)(b)(c) 分别为亮度增益为  $12000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 、 $8300 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$ 、 $6000 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$  的情况下照



(a) 目标背景对比度三维模型

the projection on the xoz curved surface



(b) 理想目标背景对比度与实际目标背景对比度曲线

(a) Target background contrast 3D model (b) Contrast curve between ideal target background and actual target background

图6 目标背景对比度数学模型

Fig.6 Mathematical model of target background contrast

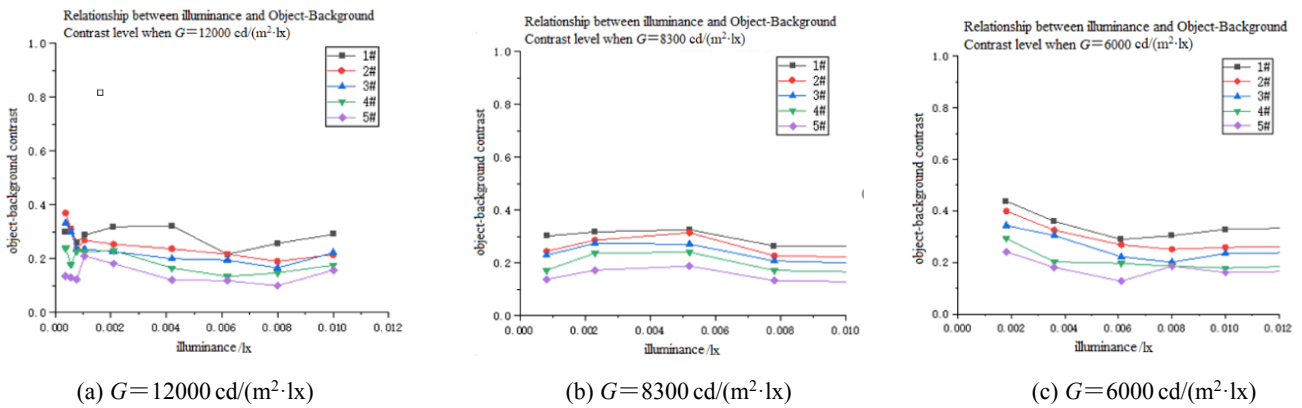


图7 不同照度对应目标背景对比度的变化关系

Fig.7 Relationship between different illuminance and target background contrast

度和对比度的对应关系。可以看出曲线均变化平缓,照度和对比度未表现出明显相关性。

根据图7中不同照度和对比度的变化趋势,在线性区间内对不同增益条件下的目标背景对比度进行比较,亮度增益分别为12000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、8300 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)时,得到图8所示的在3组不同亮度增益实验样本在输入照度[2×10<sup>-3</sup>, 8×10<sup>-3</sup>](lx)条件下的Pearson相关系数图。Pearson相关系数值在-1~1之间,当数值越接近1时,说明各组实验结果表现出越强的正相关性,当数值越接近0时,说明各组实验结果越独立。其中,相关系数在0.1~0.4表现为弱相关,0.40~0.69表现为中度相关,0.70~0.89为高度相关。

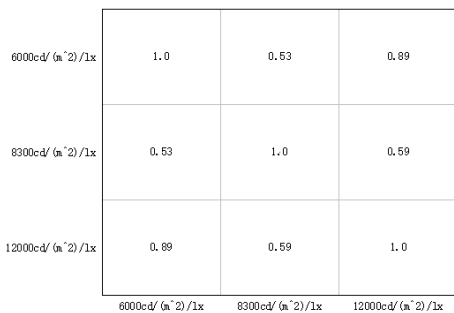


图8 3组亮度增益样本的目标背景对比度Pearson相关系数热力图

Fig.8 Target background contrast Pearson correlation of three groups of brightness gain samples

本实验结果说明不同亮度增益条件下对比度表现出中度以上的正相关性,呈现较为良好的相似性。结合式(9)可以看出,在当前的试验条件下,在照度为[2×10<sup>-3</sup>, 8×10<sup>-3</sup>](lx)区间内,对比度大小变化与亮度增益未表现出明显相关性;当照度小于2×10<sup>-3</sup> lx时,亮度增益为6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)条件下采集图像灰度值过低,目标背景对比度数值出现阶跃变化,不能正确表征图像目标与背景的差异程度,亮度增益为6000

cd/(m<sup>2</sup>·lx)与12000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、8300 cd/(m<sup>2</sup>·lx)两组试验结果的Pearson相关系数表现出低于-0.70负相关性。当照度大于8×10<sup>-3</sup> lx时,在当前试验条件限制下,可得到8300 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)在[8×10<sup>-3</sup>, 3×10<sup>-2</sup>](lx)区间内Pearson相关系数为-0.37,表现出弱负相关性。线性区间外,对比度表现出与输入照度的相关性,亮度增益数值影响目标背景对比度数值。

### 3 结论

本文从目标对比度测试原理出发,讨论亮度增益对以微光像增强器为核心的目标背景对比度测试的影响,搭建测试平台,进行暗室实验,对获得实验数据进行整理分析。通过实验得到不同亮度增益下照度-灰度、照度-目标背景对比度的变化特性以及不同亮度增益条件下目标背景对比度之间的相关性。分析结果表明:1)对比度大小受光谱反射率、CCD器件量子效率、像素面积以及辐射电磁波频率等影响综合决定;2)基于当前实验条件,亮度增益分别为12000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、8300 cd/(m<sup>2</sup>·lx)、6000 cd/(m<sup>2</sup>·lx)的测试表现为,在照度为[2×10<sup>-3</sup>, 8×10<sup>-3</sup>](lx)区间内对比度变化与亮度增益未表现出明显相关性;3)当照度过大和过小时,受像增强器亮度增益的非线性变化以及CCD的动态范围和噪声影响,测试结果失真。该结果为国产ICCD目标背景对比度测试的准确测量提供支撑。

### 参考文献:

[1] 刘必盛, 时家明, 赵大鹏, 等. 目标与背景的对比度分析及其应用[J]. 航天电子对抗, 2007, 24(3): 48-51.  
LIU Biliu, SHI Jiaming, ZHAO Dapeng, et al. Analysis and application of object and background[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2007, 24(3): 48-51.  
[2] 韩坤, 姚泽, 乔凯, 等. 微光ICCD相机的动态调制传递函数理论模型

- 研究[J]. 红外技术, 2020, 42(3): 294-299.
- HAN Kun, YAO Ze, QIAO Kai, et al. Theoretical model of dynamic MTF of low-light-level ICCD[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(3): 294-299.
- [3] 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.
- XIANG Shiming, NI Guoqiang. *The Principle of Photoelectronic Imaging Devices*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999.
- [4] 陈旭浪, 党小刚, 郭欣达, 等. 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[J]. 应用光学, 2020, 41(6): 1241-1246.
- CHEN Xulang, DANG Xiaogang, GUO Xinda, et al. Test and analysis of factors influencing target contrast ratio based on 3rd generation LLL ICCD imaging device[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(6): 1241-1246.
- [5] 田园. CCD 图像对比度测试方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2008.
- TIAN Yuan. Researching on the Testing Method of CCD Picture Contrast[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology.
- [6] 周建勋, 王利平, 徐志良. 像增强型夜视系统的图像信息传递[J]. 红外与毫米波学报, 1997, 16(4): 5.
- ZHOU Jianxun, WANG Liping, XU Zhiliang. Image information transfer of image intensified night vision system[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 1997, 16(4): 5.
- [7] 汪丽, 田维坚, 王耀祥, 等. 光锥与 CCD 耦合器件调制传递函数的测试方法[J]. 光子学报, 2005, 34(4): 3.
- WANG Li, TIAN Weijian, WANG Yaoxiang, et al. Measurement method for modulation transfer function of fiber optic taper coupled with CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(4): 3.
- [8] 王耀祥, 田维坚, 黄琨, 等. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析[J]. 光子学报, 2004, 33(3): 4.
- WANG Yaoxiang, TIAN Weijian, HUANG Kun, et al. Theoretical analysis of the coupling efficient between fiber taper and CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3): 4.
- [9] 程万胜, 赵杰, 菜鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 103-108.
- CHENG Wansheng, ZHAO Jie, CAI Hegao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(2): 103-108.
- [10] 吴厚德, 许文海. 多输出 CCD 接缝的校正[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 454-461.
- WU Houde, XU Wenhai. Correction of seams for multiple output CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 454-461.
- [11] 袁鹏程. 基于像素光子转换特性的图传感器校正方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- YUAN Pengcheng. Research on Image Sensor Correction Method Based on Pixel Transfer Characteristics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [12] 林祖伦, 王小菊. 光电成像导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- LIN Zulun, WANG Xiaoju. *Introduction to Optoelectronic Imaging*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [13] 阴浩, 刘广荣, 金伟其, 等. 像增强型 CCD 成像系统的分辨力分析[J]. 光子学报, 2010, 39(S1): 96-100.
- YIN Hao, LIU Guangrong, JIN Qiwei, et al. Resolution analysis of image enhanced CCD imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(S1): 96-100.