

doi:10.3788/gzxb20144312.1204002

# 不同位置强光源作用微光电视系统成像特征建模及分析

郭冰涛<sup>1</sup>, 王晓蕊<sup>1</sup>, 荆卫国<sup>2</sup>, 王小兵<sup>2</sup>, 陈玉娇<sup>1</sup>

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

**摘 要:** 以强光源作用微光电视成像机理为基础, 借助端到端成像建模思想, 综合考虑强光源作用目标表面辐射特性及系统自动亮度控制特性, 建立了不同位置强光作用后系统成像特征量化模型. 以模型为基础, 利用三维场景仿真平台实时计算强光源作用后地物成像灰度, 实现了不同位置微光系统成像数字仿真. 结合外场实验数据, 通过对比实验结果与仿真结果中目标和背景灰度及目标成像对比度, 对仿真模型进行了验证, 结果表明: 该模型与外场实验数据有较好的一致性, 模型可靠性较高. 最后探讨了强光作用后不同干扰因素对系统成像质量的影响, 当强光源位于系统视场外时, 其对目标表面辐射特性的作用是影响系统输出图像质量的主要因素; 当强光源位于系统视场内时, 其对系统增益的作用则成为主要因素.

**关键词:** 微光电视; 成像系统; 仿真; 强光源; 辐射特性; 信号响应特性; 对比度; 验证

中图分类号: TN221

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1204002-6

## Feature Quantitative and Simulation Analysis of Low-Light-Level TV Imaging Under Highlight Disturbance at Different Locations

GUO Bing-tao<sup>1</sup>, WANG Xiao-rui<sup>1</sup>, JING Wei-guo<sup>2</sup>, WANG Xiao-bing<sup>2</sup>, CHEN Yu-jiao<sup>1</sup>

(1 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 No. 63870 Unit of PLA, Huayin, Shaanxi 714200, China)

**Abstract:** Considering the interference of highlight on the radiation characteristics of the target surface and on the signal response characteristic of Low-Light-Level (LLL) TV, a feature quantitative model of LLL TV imaging under highlight disturbance was built based on the mechanism of highlight interference LLL TV imaging and the end-to-end imaging modeling idea. On the basis of the model, the simulation of the output image of LLL TV imaging system after highlight disturbed was performed by real-time calculating the imaging gray of ground objects on the three dimensional scene simulation platform. Contrasting the imaging gray of the target and its background and the imaging contrast of the target in the experimental results with that in the simulation results, the verification of the reliability of the simulation model was performed. The verification results show that the proposed model was greatly consistent with the experimental results and had high reliability. Finally, the influence of different interfering factors on the target imaging contrast was discussed, which showed that the role of highlight to the radiation characteristic of the target surface was the main factor that affecting the system imaging quality when the highlight was outside the field of view of the system, while the role of highlight to the system gain was the main factor when the highlight was in the field of view of the system.

**Key words:** LLL TV; Imaging system; Simulation; Highlight; Radiation effects; Signal response characteristic; Imaging contrast; Verification

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 61007014)、航空科学基金 (No. 2010181004) 资助

第一作者: 郭冰涛 (1988-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电成像建模与仿真. Email: gbtedu@sina.com

导 师: 王晓蕊 (1976-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为军用光电成像系统建模与仿真、新型光电成像与探测技术等. Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-03-25; 录用日期: 2014-05-30

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

## 0 引言

现代战争中装备的多样性使得战场光学环境不断恶化,强光源(如照明弹等)会造成微光电视系统性能下降甚至功能损失<sup>[1]</sup>. 因此为衡量微光电视系统在复杂战场环境下的作战能力,开展强光作用后微光电视系统成像特征量化分析具有重要的理论意义和应用价值.

在强光作用微光系统成像质量方面,国内外学者已经开展了大量研究工作. 其中主要有:1)强光源对系统成像噪声的影响. Reis A. George 等通过实验测试了不同光亮的强光源作用时,系统输出图像噪声的变化<sup>[2]</sup>. 2)强光源对系统成像光晕的影响<sup>[3]</sup>. Estrera Joseph P 等讨论了系统光晕形成机理;崔东旭等通过实验验证了强光导致系统成像光晕的机理<sup>[4]</sup>;闫磊等进一步对系统成像光晕进行了模拟<sup>[5]</sup>. 3)强光源对系统最小分辨率的影响. Estrera Joseph P 通过实验测量了不同自然光照强度下系统成像最小分辨率<sup>[6]</sup>; LaVeigne Joe 等结合实验研究了不同能量激光对系统成像最小分辨率的影响<sup>[7]</sup>. 4)强光源对微光成像系统调制传递函数的影响. Ortiz Sergio 等分析了强光源影响系统调制传递函数的机理<sup>[8]</sup>;拜晓锋等通过实验研究了不同光照强度下系统调制传递函数的变化规律<sup>[9]</sup>. 5)强光源对系统饱和特性的影响. 张乐等通过实验研究了某型号微光系统的饱和和光照阈值<sup>[10]</sup>. 但 these 工作均没有综合考虑强光源对目标表面辐射特性及系统信号响应特性的影响,研究强光源对系统输出图像质量的作用.

本文建立了不同位置强光作用后系统成像特征量化模型,并在模型基础上,实现了不同位置强光源作用后系统成像数字仿真模型的构建,结合实验数据验证了该模型的可靠性,探讨了不同干扰因素对系统成像质量的影响.

## 1 强光源作用后系统成像特征建模

当强光源位于不同位置时其作用微光电视系统成像质量的机理不同:1)当强光源位于系统视场外时,强光源作用目标表面辐射特性影响系统成像质量;2)当强光源位于系统视场内时,一方面强光源通过作用目标表面光学特性导致目标表面辐射特性发生变化,另一方面强光源通过直接作用成像系统导致系统信号响应特性发生变化,从而影响系统成像质量. 因此,将重点研究强光源作用目标表面辐射特性和系统信号响应特性,建立不同位置强光作用后系统成像特征量化模型.

### 1.1 强光源作用目标表面辐射特性建模

当强光源位于系统视场内或系统视场外时,会影响目标表面辐射特性. 为准确表征强光源对目标表面

辐射特性的影响,引入双向反射率(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)的概念<sup>[11]</sup>. 实验研究证明,由 Schlick 提出的 BRDF 模型<sup>[12]</sup>,与实验数据相符<sup>[13]</sup>,因此选用该模型描述目标表面的反射特性. 其表达式为

$$R(\lambda) = \left( \frac{1-G(v)G(v')}{\pi} + G(v) \frac{G(v')Z(t)}{4\pi v v'} \right) \cdot A(\omega) [C(\lambda) + (1-C(\lambda))(1-u)^5] \quad (1)$$

式中,  $t = \cos \alpha$ ,  $u = \cos \beta$ ,  $v = \cos \theta'$ ,  $v' = \cos \theta$ ,  $\omega = \cos \varphi$ , 各角度与向量的定义如图 1;  $C(\lambda) \in [0, 1]$ , 表示波长  $\lambda$  下的反射因子, 值与目标表面材质有关;  $A(\omega) = \sqrt{p/(p^2 - p^2 \omega^2 + \omega^2)}$ ,  $Z(t) = r/(1 + rt^2 - t^2)^2$ ,  $G(v) = v/(r - rv + v)$ ,  $G(v') = v'/(r - rv' + v')$ ;  $r \in [0, 1]$  表示物体表面粗糙度因子;  $p \in [0, 1]$  表示物体表面各向同性因子.

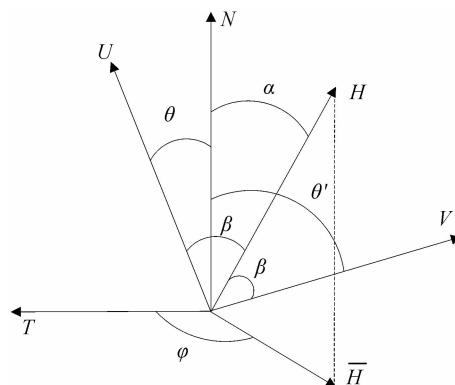


图 1 Schlick BRDF 模型各角和向量的定义  
Fig. 1 Angles and vectors for Schlick BRDF

根据双向反射函数的定义及立体角投影定理<sup>[13]</sup>, 强光源作用后目标表面在观测方向产生的光亮度可表示为

$$L_o = R(\lambda) \left( \frac{I_a(\lambda) \cos \theta_i \tau_a(\lambda)}{d^2} + E_e(\lambda) \right) \quad (2)$$

式中,  $I_a(\lambda)$  表示强光源产生的光强度,  $\theta_i$  表示入射光与目标表面面元之间的夹角,  $\tau_a(\lambda)$  表示强光源与目标之间大气的透过率,  $d$  表示强光源与目标表面面元之间的距离,  $E_e(\lambda)$  表示环境光在目标表面面元处产生的光照度.

### 1.2 强光源位于系统视场外时系统成像特征建模

为建立强光源位于系统视场外时系统信号响应特性模型,需要充分了解微光电视系统各环节对目标能量的逐级传递. 强光源作用后目标表面在系统光阴极面上产生的光照度为  $E_i(\lambda)$  可表示为

$$E_i(\lambda) = \frac{\pi D_o^2}{4f_o^2(1+q_o)^2} \tau_o(\lambda) L_o(\lambda) \tau_s(\lambda) \quad (3)$$

式中,  $L_o(\lambda)$  表示强光源作用后目标表面在观测方向产生的光亮度,  $D_o$  表示光学系统入瞳孔径直径,  $f_o$  表示

光学系统焦距,  $\tau_o(\lambda)$  表示光学系统透过率,  $\tau_n(\lambda)$  表示大气透过率,  $q_o$  表示光学系统放大率。

微光系统的亮度增益  $G$  与电子透镜的工作电压有关,常将亮度增益近似为电子透镜工作电压的线性函数<sup>[15]</sup>,则荧光屏的输出亮度  $L_t(\lambda)$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} L_t(\lambda) = G(\lambda)E_i(\lambda) \\ G(\lambda) = S(\lambda)(V_1 + V_2)G_p K/q_e^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $S(\lambda)$  表示光电阴极灵敏度,  $V_1$  和  $V_2$  分别表示电子透镜 1 和电子透镜 2 的工作电压,  $G_p$  表示微通道板 (micro-channel plate, MCP) 的增益,与施加在微通道板两端的电压有关,  $K$  表示荧光屏的光视效能,  $q_e$  为系统的电子光学放大倍数。针对光学耦合式增强电荷耦合器件 (Intensified Charge Coupled Device, ICCD), 荧光屏的输出亮度再经目镜 (耦合透镜)、微光电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 响应、视频电路处理, 得到输出电压为

$$V_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{D_o^2 \pi}{4f_o^2} \tau_c(\lambda) L_t(\lambda) R_c(\lambda) A_c G_v d\lambda \quad (5)$$

式中,  $[\lambda_1, \lambda_2]$  表示系统光谱响应范围,  $D_o$  表示目镜直径;  $f_o$  表示目镜的焦距,  $\tau_c(\lambda)$  表示目镜或耦合透镜的透过率,  $R_c(\lambda)$  表示系统响应率,  $A_c$  表示系统有效光敏元面积,  $G_v$  表示视频信号放大倍数。对系统的输出电压进行量化, 可得系统输出图像灰度特征为

$$T_i = \frac{255}{V_m - V_n} V_i \quad (6)$$

式中,  $V_m$  和  $V_n$  分别表示系统电压信号量化范围最大值与最小值。

### 1.3 强光源位于系统视场内时系统成像特征建模

当强光源位于系统视场内时, 除影响目标表面辐射特性外, 还会影响系统信号响应特性。由微光系统自动亮度控制电路工作原理可知<sup>[16]</sup>: 当入射光强变化小时, 系统自动亮度控制电路的作用较小, 而当入射光强变大时, 自动亮度控制电路能够降低微通道板增益, 从而导致系统信号响应特性发生变化。

假设某场景中强光辐射源亮度为  $L_d(\lambda)$ , 系统电压量化范围为  $V_n \sim V_m$ , 自动亮度控制电路作用前系统微通道板增益值为  $G_p$ 。依据系统各环节对目标能量的逐级传递, 可知自动亮度控制电路作用前目标成像电压及灰度值可表示为

$$\begin{cases} V_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \frac{D_o D_e \pi}{4q_e f_o f_e (1 + q_o)} \right)^2 \tau_c(\lambda) R_c(\lambda) A_c G_v \cdot \\ S(\lambda)(V_1 + V_2)G_p K \tau_o(\lambda) \tau_n(\lambda) L_o(\lambda) d\lambda \\ T_i = \frac{255}{V_m - V_n} V_i \end{cases} \quad (7)$$

当强光源出现在视场内时, 自动亮度控制电路会调整微通道增益档位。其调整的幅度与强光源产生的电压信号  $V_d$  密切相关,  $V_d$  可表示为

$$V_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \frac{D_o D_e \pi}{4q_e f_o f_e (1 + q_o)} \right)^2 \tau_c(\lambda) R_c(\lambda) A_c G_v \cdot S(\lambda)(V_1 + V_2)G_p K \tau_o(\lambda) \tau_n(\lambda) L_d(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

假设  $(V_d - V_n)/(V_m - V_n) = x$ , 则自动亮度控制电路作用后系统微通道板增益自动调整为  $G'_p = G_p/x$ , 那么此时系统产生的电压信号及输出图像灰度特征调整为

$$\begin{cases} V'_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left( \frac{D_o D_e \pi}{4q_e f_o f_e (1 + q_o)} \right)^2 \tau_c(\lambda) R_c(\lambda) A_c G_v \cdot \\ S(\lambda)(V_1 + V_2)G'_p K \tau_o(\lambda) \tau_n(\lambda) L_o(\lambda) d\lambda \\ T'_i = \frac{255}{V_m - V_n} V'_i \end{cases} \quad (9)$$

## 2 强光源作用微光系统成像数字仿真

以所提理论模型为基础, 模拟了不同位置强光作用后微光电视系统的输出图像。具体仿真过程为

### 1) 场景建模。

利用 3dMax 软件生成目标及其背景的三维模型, 并导入基于 OGRE 的三维场景仿真程序中, 生成特定环境景象。

### 2) 目标表面空间辐射特性计算。

目标表面面元的位置和法线方向是在利用三维图形制作软件 3DMax 建立模型时就已确定。在图像渲染的每一帧, 根据强光源的位置和发光强度、观测位置以及地物表面面元的位置和法线方向向量  $\mathbf{N}$ , 可以实时计算每一块地物表面面元处的入射光反方向向量  $\mathbf{U}$ 、反射光方向向量  $\mathbf{V}$  及强光源在目标表面面元处产生的光照度。

结合强光源和环境光在目标表面面元处产生的光照度, 根据式(2)可以实时计算出目标表面面元在观测方向产生的光亮度  $L_o$ 。

### 3) 不同位置强光源作用后系统输出图像灰度特征计算。

在图像渲染的每一帧, 根据强光源位置、观测方向及系统视场角, 判断强光源是否在系统视场内。如果强光源不在系统视场内, 则根据式(3)~(6)计算强光源作用后目标表面面元生成的图像灰度; 如果强光源在系统视场内, 则根据式(7)~(9)计算目标表面面元生成的图像灰度。

## 3 实验结果及分析

为验证强光源作用微光系统成像数字仿真模型, 模拟了不同位置强光源作用后某型号微光系统输出图像, 并与实验结果进行对比。

### 3.1 模拟结果

在模拟过程中, 设置目标位置坐标为 (4 130, 20, -431), 单位为 m; 观测位置坐标为 (3 810, 45, -435), 单位为 m; 强光源初始坐标为 (4 140, 320, -400), 单

位为 m; 设置夜天光在地面产生的平均光照度为  $2 \times 10^{-3}$  lx, 强光源平均光强度为  $5 \times 10^5$  cd. 无强光源作用时, 某型号微光系统输出图像模拟结果如图 2 (a). 强光源位置从相对目标高度为 300 m 移动至 50 m, 系统输出图像模拟结果如图 2 (b)~(f). 其中目标位置如图中方框所示. 为模拟微光系统噪声特性, 在理想模拟结果中添加了高斯噪声.

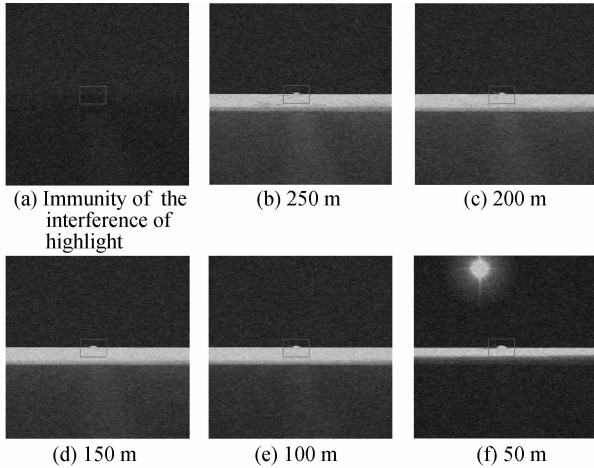


图 2 强光源作用前和不同高度强光源作用后场景输出图像模拟结果

Fig. 2 The simulation results of the scene before and when the highlight at different location interference

### 3.2 实验结果

为验证强光作用微光电视系统成像特征量化模型, 进行了外场强光源作用微光系统实验. 实验过程中探测器距离目标 500 m, 强光源初始高度为 300 m. 实验测量夜天光在地面产生的平均光照度为  $2 \times 10^{-3}$  lx, 强光源的平均发光强度约为  $5 \times 10^5$  cd. 采集强光源作用前和强光源位置从相对目标高度为 300 m 移动至 50 m 过程中微光系统输出图像, 结果如图 3. 其中目标位置如图中方框所示.

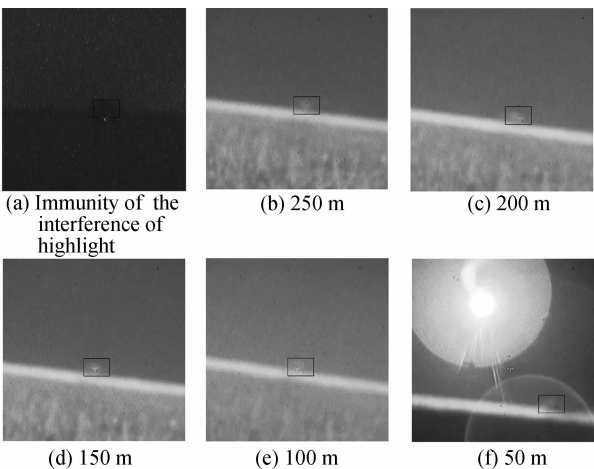


图 3 实验数据收集结果

Fig. 3 The results of experimental data

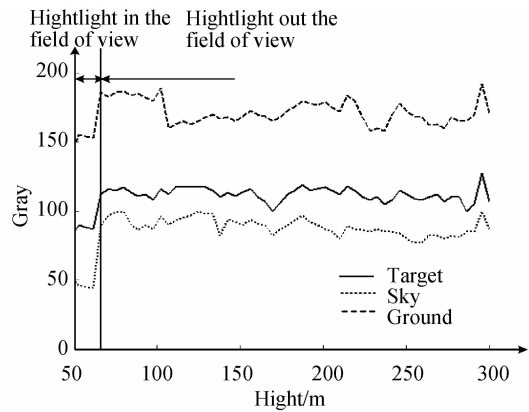
### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 灰度均值对比分析

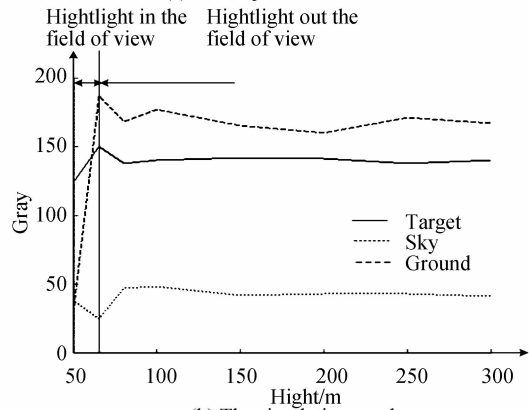
为验证所述模型的可靠性, 计算了不同位置强光源作用后, 实验结果和模拟结果中目标、天空背景、地面背景成像灰度平均值(如图 4), 并在此基础上对模拟结果进行了误差分析(如图 5), 其中误差表达式为

$$e = \frac{|T_s - T_e|}{T_e} \quad (10)$$

式中,  $T_s$ 、 $T_e$  分别表示模拟图像灰度和实验图像灰度.



(a) The experimental result



(b) The simulation result

图 4 不同位置强光源作用后实验结果和模拟结果中目标、天空背景、地面背景成像灰度平均值

Fig. 4 The average gray of target, sky and ground in experimental results and simulated results when the highlight at different locations

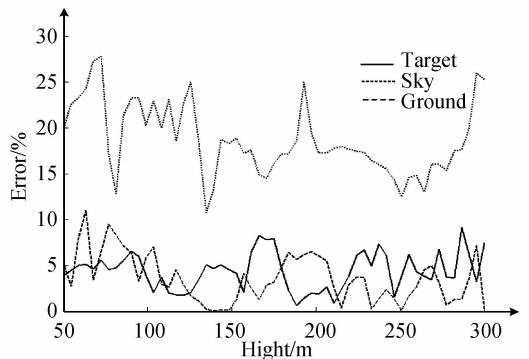


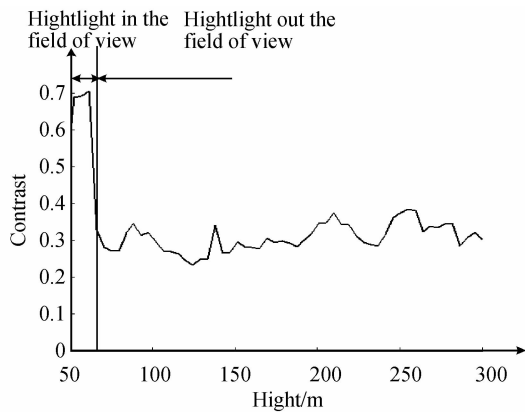
图 5 模拟结果中目标、天空背景、地面背景成像灰度相对误差计算结果

Fig. 5 The relative error of the imaging gray of target, sky and ground in simulated results

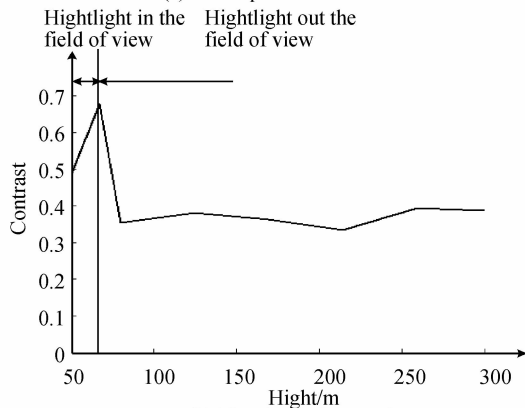
由图4和图5可以看出:模拟结果与实验结果中目标、天空和地面成像灰度变化趋势相似,且模拟结果中目标、地面背景成像灰度误差较小;天空背景成像灰度平均值误差较大,其主要原因是模拟过程中没有考虑强光源对系统接收到的杂散光的影响。

### 3.3.2 对比度对比分析

计算了实验结果和模拟结果中强光源位于不同位置时目标成像对比度(如图6),并在此基础上对模拟结果进行了误差分析(如图7)。其中,目标成像对比度表达式为



(a) The experimental result



(b) The simulation result

图6 强光源位于不同高度时目标成像对比度

Fig. 6 The target imaging contrast when the highlight at different locations

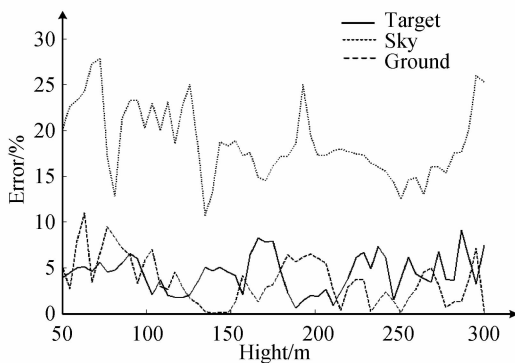


图7 模拟结果中目标成像对比度相对误差计算结果

Fig. 7 The relative error of the imaging contrast of target in

simulated results

$$C_b = \frac{|\overline{T}_t - \overline{T}_b|}{\overline{T}_b} \quad (11)$$

式中, $\overline{T}_t$ 、 $\overline{T}_b$ 分别表示目标及其背景成像平均灰度。

由图6和图7可以看出:实验结果与模拟结果中目标成像对比度计算结果差异较小,且目标成像对比度随强光源位置变化趋势相似。进一步表明本文模型能够反映不同位置强光源作用后微光电视系统输出图像中目标成像对比度的变化,可靠性较高。

### 3.3.3 不同干扰因素对系统成像质量的影响分析

由计算结果可以看出:1)当强光源位于系统视场外时,随着强光源与目标之间距离减小,目标成像对比度变化不大,其主要原因是随着强光源与目标之间距离减小,强光源对目标及其背景表面辐射特性影响程度增大,导致目标及其背景产生电压超过了系统电压量化范围。此时强光源对目标表面辐射特性的作用是影响系统输出图像质量的主要因素。2)当强光源位于系统视场内时,随着强光源与目标之间距离减小,目标成像对比度先迅速增大,然后逐渐减小。其主要原因是当强光源进入系统视场内时,导致目标及其背景表面辐射特性和微通道板增益同时发生变化。强光源刚进入系统视场内时对系统增益的作用是影响系统输出图像质量的主要因素,随着强光源与目标之间距离减小,其对目标及其背景表面辐射特性影响程度增大,对目标表面辐射特性的作用逐渐成为影响系统输出图像质量的主要因素。

## 4 结论

本文定量分析了不同位置强光作用后微光系统成像特征量化特性,探讨了强光源作用后不同因素对系统成像质量的影响。实验结果表明:所建立的强光作用微光电视系统成像特征量化模型与外场实验数据有较好的一致性,具有较高的可靠性;当强光源位于系统视场外时,其对目标表面辐射特性的作用是影响系统输出图像质量的主要因素;当强光源位于系统视场内时,其对系统增益的作用是影响系统输出图像质量的主要因素。研究工作可为复杂战场环境下微光电视系统作战能力的评估提供客观可靠的实验数据和理论依据。

### 参考文献

- [1] SABATINI R, RICHARDON M A, CANTIello M, *et al.* Night vision imaging systems design, integration and verification in military fighter aircraft[C]. SPIE, 2012, **8439**: 84390R.
- [2] REIS G A, MARASCO P L, HAVIG P R, *et al.* Psychophysical measurement of night vision goggle noise using a binocular display[C]. SPIE, 2004, **5442**: 13-24.
- [3] ESTRERA J P, OSTROMEK T E, ISBELL W, *et al.* Modern night vision goggles for advanced infantry applications[C]. SPIE, 2003, **5079**: 196-207.
- [4] CUI Dong-xu, REN Ling, SHI Feng, *et al.* Test and analysis of

- the Halo in low-light-level image intensifiers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(6):060401.
- [5] YAN Lei, SHI Feng, CHENG Yao-jin, *et al.* Performance of low light level night vision device affected by backscattered electron from Ion barrier film[C]. SPIE, 2012, **8419**:84192Y.
- [6] ESTRERA J P. Low light level limiting resolution of various digital imaging and image intensified systems[C]. SPIE, **7326**: 73260J.
- [7] LAVEIGNE J, RICH B, MCHUGH S, *et al.* Non-optically combined multi-spectral source for IR, visible, and laser testing [C]. SPIE, 2010, **7662**:766214.
- [8] ORTIZ S, OTADUY D, DORRONSORO C. Optimum parameters in image intensifier MTF measurements[C]. SPIE, 2004, **5612**:382-391.
- [9] BAI Xiao-feng, SU Jun-hong, SHI Feng, *et al.* Illumination effect on MTF of 3rd generation low-light-level image intensifier[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **32**(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[J]. *应用光学*, 2010, **32**(2):397-300.
- [10] ZHANG Le, ZHAO Wei, SHAO Ming, *et al.* Experiment study on saturation effect of 1.06 $\mu$ m laser jamming TDI CCD camera[J]. *Infrared and Laser Engineer*, 2013, **42**(S1): 38-42.  
张乐, 赵威, 邵铭, 等. TDI CCD 相机的 1.06 $\mu$ m 激光饱和干扰实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(S1): 38-42.
- [11] PAN Yong-qiang, WU Zhen-sen, HANG Ling-xia. Influence of Ag thin films on surface roughness and light scattering of optical substrate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1197-1201.  
潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 银薄膜对光学基底表面粗糙度及光散射的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1197-1201.
- [12] CHRISTLEIN V, RIESS C, ANGELOPOULOU E, *et al.* The impact of specular highlights on 3D-2D face recognition[C]. SPIE, 2013, **8712**:871207.
- [13] NGAN A, DURAND F, MATUSIK W. Experimental analysis of BRDF models[C]. Eurographics Symposium on Rendering, 2005, 117-226.
- [14] WANG Xiao-rui, ZHANG Jian-qi, FENG Zhuo-xiang, *et al.* Characterization method for low-light-level TV imaging system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9):1111-1115.  
王晓蕊, 张建奇, 冯卓祥, 等. 微光电视成像系统表征方法[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(9): 1111-1115.
- [15] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京理工大学出版社, 1995.
- [16] GUO Bing-tao, WANG Xiao-rui, JING Wei-guo, *et al.* The influence of the automatic brightness control on the adaptation of low-light-level TV to high light [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(10):2582-2586.  
郭冰涛, 王晓蕊, 荆卫国, 等. 自动亮度控制对微光电视系统 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(10):2582-2586.