

引用格式: ZHANG Qin, BAI Xiaofeng, CHENG Hongchang, et al. Research on Signal-to-noise Ratio of Low-light Level Image Intensifier Based on Night Sky Light Spectrum Matching[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0304005
张琴,拜晓锋,程宏昌,等. 基于夜天光光谱匹配的微光像增强器信噪比研究[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0304005

基于夜天光光谱匹配的微光像增强器信噪比研究

张琴^{1,2}, 拜晓锋^{1,2}, 程宏昌^{1,2}, 焦岗成^{1,2}, 李周奎^{1,2}, 韩坤^{1,2}, 李琦^{1,2}

(1 微光夜视技术重点实验室, 西安 710065)

(2 昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘 要:针对现有微光像增强器的信噪比实验室测试结果无法准确描述其在实际夜天辐射条件下工作时信噪比的问题,依据光阴极与夜天光光谱匹配关系和光子噪声起伏理论推导了微光像增强器的输出信噪比理论计算模型。在基于典型微光像增强器参数对模型验证的基础上,计算了典型超二代和三代像增强器在实际夜天辐射条件下工作时的信噪比。结果表明,实际夜天辐射条件下的信噪比与实验室 A 光源测试条件下的信噪比存在较大差异,且超二代和三代像增强器的信噪比在实际夜天辐射条件下显示出相较实验室测量时更大的差异性。本研究可为实际夜天辐射工作条件下的微光像增强器信噪比评价提供一种可用途径。

关键词:微光像增强器;夜天辐射;光谱匹配;信噪比;A 光源

中图分类号: TN223

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225103.0304005

0 引言

微光像增强器是微光夜视设备的核心器件,分别以 Na_2KSb 和 GaAs 材料作为光电阴极的超二代和三代微光像增强器是国内主要发展的两项微光夜视器件^[1-2]。作为微光像增强器的一项重要性能指标,信噪比是决定其在微光条件下探测极限的性能参数,因此对信噪比的准确评价有助于掌握微光像增强器的极限探测能力和实际工作状态^[3]。

在光电图像的传递过程中,光阴极的量子噪声、微通道板和荧光屏的颗粒噪声都会为图像的传递链增加噪声,从而降低图像的信噪比^[4]。对于微光像增强器信噪比的实验室测试手段相对成熟,通常采用光电倍增管作为核心探测器件来对输出光斑图像的信号和噪声进行探测^[5]。国外,荷兰 DEP 公司率先依据信噪比测试原理研制出第一台成熟的微光像增强器信噪比测试系统。国内,2002 年,钱芸生等对一台荷兰 DEP 公司进口的信噪比测试设备进行了解剖分析和改造升级^[6];2004 年,周斌等引入了数字图像处理技术来对不同空间频率图像的传递信噪比进行了测试^[7];2013 年,王生云等基于传统像增强器信噪比测试方法设计了信噪比测试系统^[8]。微通道板(Microchannel Plate, MCP)是像增强器噪声引入的核心器件,对其噪声特性研究方面,2012 年,崔东旭等用热阴极发射的电子流模拟光阴极发射的电子流对 MCP 的输出信噪比进行了测试^[9];2017 年,李丹等基于噪声因子提出了 MCP 的最优制备工艺和工作条件^[10];2020 年,李晓峰等研究了微通道板噪声因子与工作电压的关系^[11],2021 年结合相关实验分析了微通道板结构参数对噪声因子的影响并为 MCP 的结构设计提供了优化意见^[12]。以往研究中的测试系统和相关的理论分析研究都是以 2 856 K 的 A 光源作为照明光源来设计和讨论的,尚未考虑微光像增强器在实际的夜天光条件下工作时的信噪比测量和理论分析问题。

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(No.J20190102)

第一作者: 张琴(1994—),女,工程师,硕士,主要研究方向为微光夜视器件及系统性能评价。Email: 741379712@qq.com

收稿日期: 2021-09-26; 录用日期: 2021-11-17

[http:// www.photon.ac.cn](http://www.photon.ac.cn)

实验室测试中规定的测试光源为 2 856 K 的 A 光源,由于实际夜光天与 A 光源的光谱分布存在较大差异,实验室信噪比测量结果无法准确描述微光像增强器在实际夜天光条件下工作时的信噪比,且实际夜天光光谱分布相对复杂,实验室测试光源难以模拟。针对这一问题,本文将推导信噪比的理论计算模型,从而对像增强器在光谱分布更为复杂的夜天光条件下工作时的信噪比进行准确评价,并对超二代和三代微光像增强器在三种夜天辐射条件下的实际工作信噪比进行对比分析。

1 信噪比的实验室测量

图 1 为微光像增强器的基本结构,主要包括传输光学图像的阴极玻璃输入窗(Input window)、进行光电转换的光阴极(Photocathode)、进行电子倍增的微通道板(MCP),以及将光电子图像进行电光转换显示的荧光屏(Phosphor screen)。

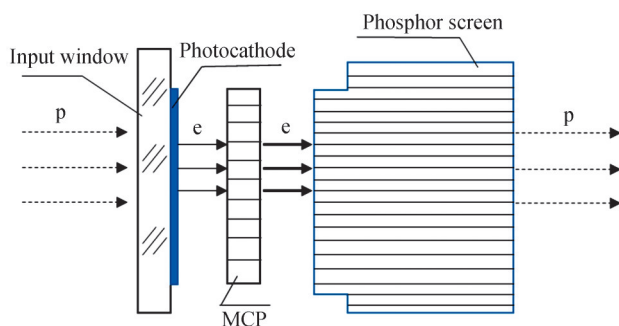


图 1 微光像增强器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the low-light image intensifier

在光电图像的传递过程中,光阴极的量子噪声、微通道板和荧光屏的颗粒噪声都会为图像的传递链增加噪声,从而降低图像的信噪比。

在实验室进行的信噪比测量原理为^[13]:给像增强器施加工作电压,采用色温 2 856 K、照度 1.08×10^{-4} lx 的卤钨灯照射针孔靶标,通过投影物镜在光阴极中心区形成一个直径为 0.2 mm 的圆斑,在荧光屏上形成一个圆亮斑,则信噪比 Φ 可表示为一等效带宽光电探测器从荧光屏上测得的输出亮度的直流信号 S 与其噪声信号 N 的均方根值之比,即

$$\Phi = \frac{S_a - S_b}{\beta(N_a - N_b)^{1/2}} \quad (1)$$

式中, S_a 为有光照射条件下荧光屏输出亮度的直流信号值, S_b 为无光照射时荧光屏输出亮度的直流信号值, N_a 为光致噪声值, N_b 为背景噪声值, β 是等效带宽为 10 Hz(对应人眼积分时间为 0.1 s)时对荧光屏发光光谱的修正系数。

2 微光像增强器输出信噪比理论模型推导

2.1 光阴极输出光电子数

夜天光光谱成分相对复杂,包含了月光、星光、大气辉光等多种自然辐射源。满月晴朗天气条件的夜天光辐射光谱主要取决于月光,而星光和大气辉光则是无月天气条件的主要成分,但由于大气辉光主要集中在红外波段,即像增强器工作波段的夜天辐射主要取决于星光的光谱分布^[12]。标准满月光和晴朗星光的光谱辐亮度曲线如图 2 所示,理想夜天辐射光谱可以等效为月光和星光辐射的线性组合。因此根据满月晴朗、1/4 月晴朗、无月晴朗三种条件下的地面照度(分别为 2×10^{-1} lx、 1×10^{-2} lx 和 1×10^{-3} lx),通过线性组合拟和出三种自然条件下的光谱辐照度分布,如图 3^[15]。

在像增强器的实际工作中,光阴极一般探测的是景物的反射光。以典型景物草地为例,图 4 是绿色草地的光谱反射率,三种夜光天的景物反射光谱反射辐照度如图 5 所示。

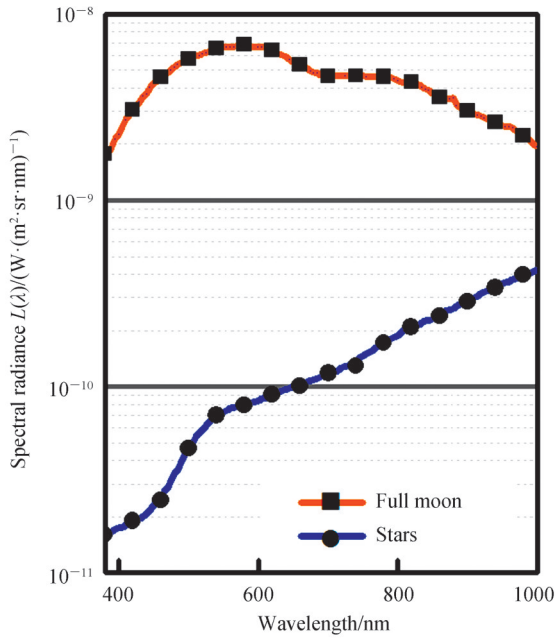


图2 满月光和晴朗星光的辐射光谱分布
Fig.2 Radiation spectral distribution of full moonlight and clear starlight

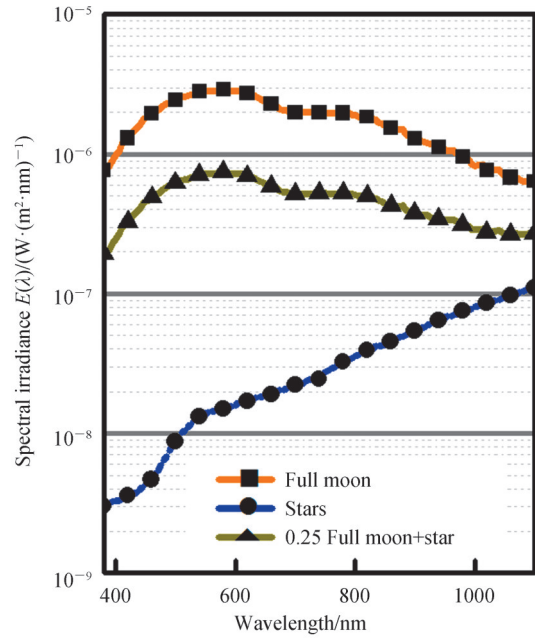


图3 三种自然条件下的光谱辐照度分布
Fig.3 Spectral irradiance distribution of three natural conditions

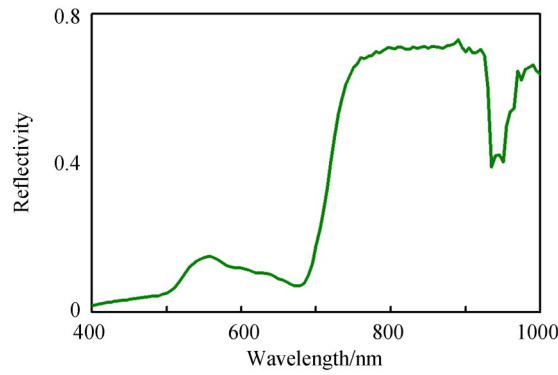
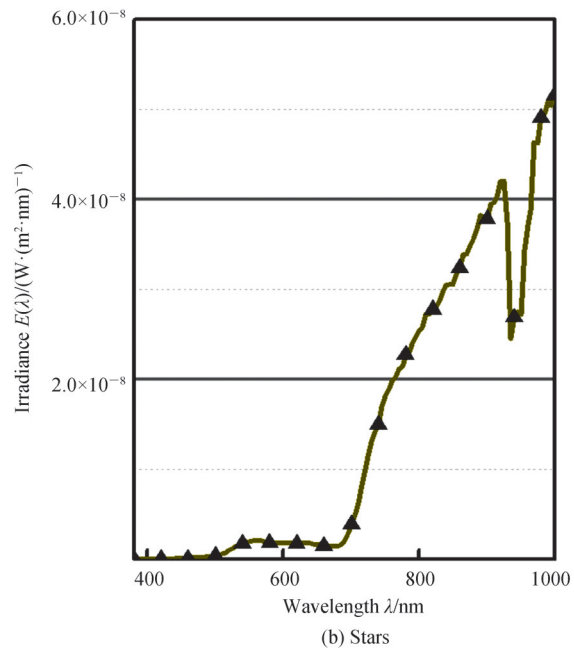
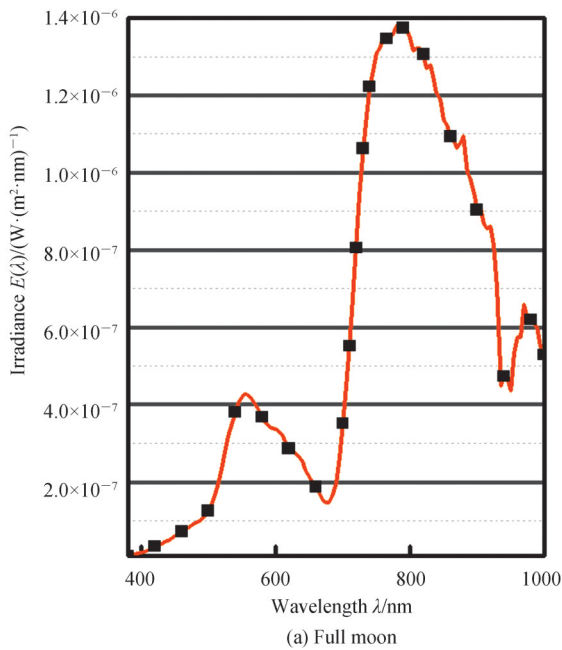


图4 草地的光谱反射率
Fig.4 Spectral reflectance of grass



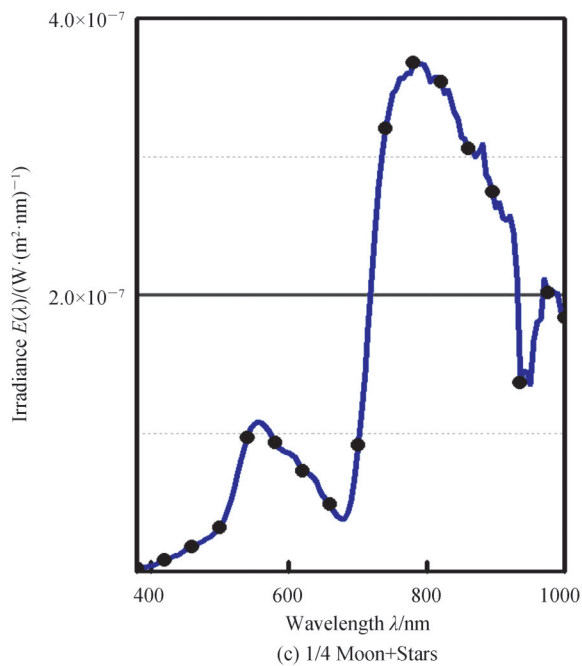


图5 三种夜天辐射条件下的景物光谱反射辐照度
Fig.5 Spectral reflection irradiance of three kinds of night radiation conditions

对于微光像增强器,实验室针对标准 A 光源测定的积分灵敏度($\mu\text{A}/\text{lm}$)可以表示为

$$S_A = \frac{\int_0^\infty P_A(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty P_A(\lambda)d\lambda} \frac{S_m}{K_A} = \frac{\alpha(S, A)S_m}{K_A} \quad (2)$$

式中, S_m 为光阴极光谱灵敏度最大值($\mu\text{A}/\text{W}$), K_A 为 A 光源的光视效能, $P_A(\lambda)$ 为 A 光源的相对单色辐射功率, $\alpha(S, A)$ 为光阴极与 A 光源的光谱匹配系数, $S(\lambda)$ 为光阴极相对光谱响应率。图 6 给出了超二代和三代微光像增强器的典型光电阴极光谱灵敏度曲线。

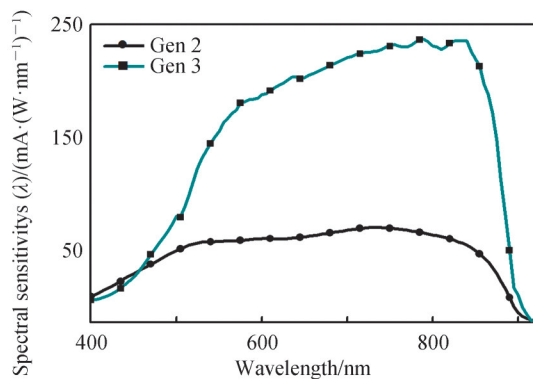


图6 超二代和三代微光像增强器的阴极光谱灵敏度
Fig.6 The cathode spectral sensitivity of Gen2 and Gen3

被测圆斑到达光阴极面的照度分布为 $E(\lambda)$ 时,光阴极单位面积产生的光电子数 \bar{n} 为^[15]

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{n} &= \frac{S_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{e} = \frac{S_A}{e} \frac{\alpha(S, E) K_A}{\alpha(S, A) K} E = \frac{S_A k E}{e} \\ k &= \frac{\alpha(S, E) K_A}{\alpha(S, A) K} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中, k 为光阴极对夜天光的积分灵敏度相较 A 光源的比例系数, E 为景物反射光在光电阴极处的照度值 (lx), e 为电子的电荷量, $\alpha(S, E)$ 和 $\alpha(S, A)$ 分别为光阴极与景物反射光和 A 光源的光谱匹配系数, K 为景物反射光的光视效能。

超二代和三代微光像增强器光阴极与 A 光源的光谱匹配系数分别为 $\alpha(S_{\text{Gen2}}, A) = 0.897$, $\alpha(S_{\text{Gen3}}, A) = 0.852$, A 光源的光视效能 $K_A = 121.276$ 。计算几种夜天辐射条件下的积分灵敏度转换系数, 相关参数如表 1 所示。

表 1 不同夜天辐射条件下的超二代和三代微光像增强器的相关参数
Table 1 Related parameters of Gen2 and Gen 3 under different night radiation conditions

Radiation	$K_x/(\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$	$\alpha(S, E_x)$		k	
		Gen2	Gen3	Gen2	Gen3
Full moon	60.268	0.673	0.657	1.510	1.552
Stars + $\frac{1}{4}$ moon	55.823	0.649	0.635	1.572	1.619
Stars	12.134	0.411	0.422	4.580	4.950
Stars with clouds	12.134	0.411	0.422	4.580	4.950

2.2 微通道板的噪声因子

任何一个有源网络在处理(例如放大)输入信号后, 都会在其输出信号中附加一定的噪声, 用噪声因子 F_ϕ 来评价其信噪比特性的恶化程度, 表示为^[11]

$$F_\phi = \Phi_{\text{in}}^2 / \Phi_{\text{out}}^2 \quad (4)$$

式中, Φ_{in} 和 Φ_{out} 分别为输入信噪比和输出信噪比。

MCP 的噪声因子 F_ϕ 主要受限于它的有限开口面积比 F 、输入面第一次撞击二次发射系数 δ_0 , 和通道内电子倍增过程中的电子数统计涨落(可用增益为 G/δ_0 的连续倍增过程的标准偏差表征)。假设输入为单光电子倍增情况, 则 F_ϕ 可表示为

$$F_\phi = \frac{1}{F} \left\{ 1 + \frac{1}{\delta_0} + \left[\frac{1 + (G/\delta_0)}{G} \right] \right\} \quad (5)$$

2.3 微光像增强器输出信噪比模型

根据光量子噪声起伏理论, 假设光斑面积为 $a(\text{m}^2)$, 单位面积单位时间内经过光阴极光电转换产生的光电子数为 \bar{n} , 在系统积分时间 $t(\text{s})$ 内产生的累积光电子数为 $\bar{n}ta$, 该光电子数的统计涨落为 $\sqrt{2\bar{n}ta}$ 。假设像增强器的等效背景照度为 E_{BI} , 光阴极的量子效率为 η , 从而产生的信号 S 和噪声 N 分别为^[15]

$$\begin{cases} S = \bar{n}ta \\ N = \sqrt{2(\bar{n}ta + E_{\text{BI}}\eta ta)} \end{cases} \quad (6)$$

考虑到平均光电子数 \bar{n} , 经光阴极光电转换后入射到微通道板的光电子图像信噪比 Φ_{in} 为

$$\Phi_{\text{in}}^2 = \bar{n}^2 ta / 2(\bar{n} + E_{\text{BI}}\eta) \quad (7)$$

结合式(3)给出的光阴极面的光电子数公式以及 MCP 噪声因子, MCP 的输出信噪比 Φ_{out} 为

$$\Phi = \frac{\bar{n}^2 ta}{2F_\phi(\bar{n} + E_{\text{BI}}\eta)} = \frac{\frac{S_A^2 E_C^2}{e^2} ta}{2F_\phi \left(\frac{S_A E_C}{e} + E_{\text{BI}}\eta \right)} = \frac{S_A E_C ta}{2eF_\phi(1 + E_{\text{BI}}/E_C)} \quad (8)$$

进一步可得

$$\Phi_{\text{out}} = \left[\frac{S_A E_C ta}{2eF_\phi(1 + E_{\text{BI}}/E_C)} \right]^{1/2} \quad (9)$$

考虑到微光夜视系统结构, 入射到光电阴极面处的照度 E_C 为

$$E_c = \frac{1}{4} \rho E_0 \tau_0 \tau_d \left(\frac{D}{f'_0} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f'_0} \right)^2 \right]^{-1} \quad (10)$$

式中, E_0 为环境照度, f'_0 为微光夜视系统物镜焦距, D 为物镜直径, τ_0 为物镜透过率, τ_d 为大气透过率。因为荧光屏的颗粒噪声远小于 MCP 的颗粒噪声, 所以式(9)可以近似看作像增强器的输出信噪比。

2.4 输出信噪比模型验证

三代像增强器的 MCP 带有防离子反馈膜, 因此其噪声因子要大于超二代。表 2 为某超二代和三代像增强器的典型参数^[10-11], 分别对其进行实验室信噪比测试和理论计算。

表 2 某超二代和三代像增强器典型参数
Table 2 Typical parameters of Gen2 and Gen3

	$S_A/(\mu A \cdot lm^{-1})$	F_ϕ	Φ		δ
			Experimental	Calculation	
Gen2	702	1.15	25.41	25.83	1.6%
Gen3	1 856	2.48	27.88	28.13	0.9%

结果表明: 理论计算值与实际测试结果相差很小, 不大于 2%。理论计算值稍大于测试值是因为理论模型推导中忽略了荧光屏的颗粒噪声影响。

3 微光像增强器输出信噪比计算及分析

根据式(9)对不同夜天辐射条件下的超二代和三代像增强器的实际输出信噪比进行理论计算, 并与相应照度条件下的实验室测试结果进行比对。表 3 给出了计算时所需的超二代和三代像增强器的典型参数以及某微光夜视镜系统的成像物镜参数。

表 3 信噪比计算所需参数
Table 3 Parameters required for the signal-to-noise ratio calculation

a/mm	$S_A/(\mu A \cdot lm^{-1})$		F_ϕ		$E_{BI}/\mu lx$	Objective lens system parameters		
	Gen2	Gen3	Gen2	Gen3		f'_0/mm	D/mm	τ_0
0.2	702	1 856	1.15	2.48	0.25	20.7	16	0.85

根据式(9)给出的信噪比计算模型, 得到表 4~6 所示的三种夜天光辐射以及对应光阴极照度的测试光源(2 856 K 标准 A 光源)照射条件下超二代和三代像增强器的信噪比计算结果。

表 4 无月浓云条件下超二代和三代微光像增强器的输出信噪比
Table 4 The output signal-to-noise ratio of Gen2 and Gen3 under the stars with clouds

	A light	Stars with clouds	δ
	$7.44 \times 10^{-6} lx$	$7.44 \times 10^{-6} lx$	
Gen2	6.56	14.05	114%
Gen3	7.27	16.18	123%
Δ	0.71	2.13	

表 5 晴朗星光条件下超二代和三代微光像增强器的输出信噪比
Table 5 The output signal-to-noise ratio of Gen2 and Gen3 under the stars

	A light	Stars	δ
	$3.72 \times 10^{-5} lx$	$3.72 \times 10^{-5} lx$	
Gen2	14.88	31.84	114%
Gen3	16.47	36.65	123%
Δ	1.59	4.81	

表6 1/4月下超二代和三代微光像增强器的输出信噪比
Table 6 The output signal-to-noise ratio of Gen2 and Gen3 under the stars with 1/4 moon

	A light	Stars + 1/4 moon	δ
	$3.72 \times 10^{-4} \text{lx}$	$3.72 \times 10^{-4} \text{lx}$	
Gen2	47.20	59.17	25%
Gen3	52.25	66.49	27%
Δ	5.05	7.32	

结果表明:

1) 像增强器信噪比的实验室测试条件无法描述其在这三种夜天光条件下的实际工作状态。在三种夜天辐射条件下,超二代和三代微光像增强器的信噪比远大于实验室同照度A光源测试条件下的信噪比(无月浓云和晴朗星光条件下相对误差大于100%)。这是因为对于实际草地景物反射光谱,微光像增强器的灵敏度转换系数较大。

2) 三代微光像增强器在实际夜天辐射工作环境下具有一定的信噪比优势。在三种夜天辐射条件下,超二代相较三代微光像增强器的信噪比绝对差异大于实验室测试条件下的差异,且这一差异随照度的增加而增加。在晴朗星光条件下,二者的差值达到4.81。相较实验室测试条件,二者实际工作状态下的信噪比差异更为明显。

3) 极低照度水平下的理论计算有助于拓宽信噪比评价的照度范围。在晴朗星光条件下,实际景物反射光到达微光夜视系统阴极面处的照度为 10^{-5}lx 水平,在无月浓云条件下,光阴极面的实际照度甚至达到了 10^{-6}lx 水平。现行的实验室信噪比测试条件难以描述这两种夜天辐射条件下的探测极限性能,因此对于 10^{-6}lx 这一极低照度水平下的理论计算有助于拓宽信噪比评价的照度范围。

4 结论

本文在推导输出信噪比计算模型的基础上,结合超二代和三代微光像增强器的典型参数,对二者在三种夜天辐射以及对对应光阴极照度的测试光源(2856 K标准A光源)照射条件下的输出信噪比进行了计算,通过对比分析发现:1)在三种夜天辐射条件下,超二代和三代像增强器的实际信噪比远大于实验室同照度A光源测试条件下的测试结果;2)在三种夜天辐射条件下,三代微光像增强器相较超二代微光像增强器的信噪比差异大于实验室的测试差异,因此三代微光像增强器在实际夜天辐射工作环境中具有更大的信噪比优势。研究结果可为微光像增强器在光谱分布更为复杂的夜天光条件下以及极低照度水平(10^{-6}lx)下工作时的信噪比评价提供参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] GUO Hui, XIANG Shiming, TIAN Minqiang. A review of development of low light level night vision technology[J]. Infrared Technology, 2013, 35(2): 63-68.
郭晖,向世明,田民强.微光夜视技术发展动态评述[J].红外技术,2013,35(2): 63-68.
- [3] ZHOU Liwei. On quality factor of low light level image intensifier[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 331-337.
周立伟.关于微光像增强器的品质因数[J].红外与激光工程,2004,33(4): 331-337.
- [4] PANG Jingsheng. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard[J]. Infrared Technology, 2020, 42(6): 509-518.
潘京生.像增强器的迭代性能及其评价标准[J].红外技术,2020,42(6): 509-518.
- [5] XIANG Shiming. Study on the theoretical limit of signal-to-noise ratio of low-light-level image intensifier[J], Applied Optics, 2008, 29(5): 724-726.
向世明.微光像增强器信噪比理论极限问题研究[J].应用光学,2008,29(5): 724-726.
- [6] QIAN Yunsheng, CHANG Benkang, ZHAN Qihai, et al. Research on the signal-to-noise ratio measurement technology of low-light-level image intensifiers [J]. Vacuum Science and Technology, 2002,(5): 73-75.
钱芸生,常本康,詹启海,等.微光像增强器信噪比测试技术研究[J].真空科学与技术,2002,(5): 73-75.
- [7] ZHOU Bin, LIU Bingqi, MAN Bo. Research on testing image transfer signal-to-noise ratio of image intensifier [J]. Applied Optics, 2004, 25(5): 60-61.

- 周斌, 刘秉琦, 满波. 微光像增强器图像传递信噪比的测试研究[J]. 应用光学, 2004, 25(5):60-61.
- [8] WANG Shengyun, SUN Yunan, SHI Jifang, et al. Study on the signal-to-noise ratio measurement technology of three generations of low-light-level image intensifiers[J]. Applied Optics, 2013, 34(4): 676-679.
王生云, 孙宇楠, 史继芳, 等. 三代微光像增强器信噪比测量技术研究[J]. 应用光学, 2013, 34(4): 676-679.
- [9] CUI Dongxu, ZHENG Shaocheng, QIU Yafeng, et al. Output signal-to-noise ratio characteristics of microchannel plate [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(6):21-24.
崔东旭, 郑少成, 邱亚峰, 等. 微通道板的输出信噪比特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2012, 32(6):21-24.
- [10] LI Dan, ZHU Yufeng, ZHAO Huimin, et al. Research on noise factor characteristic of micro-channel plate[J]. Infrared Technology, 2017, 39(11): 1066-1070.
李丹, 朱宇峰, 赵慧民, 等. MCP 噪声因子特性研究[J]. 红外技术, 2017, 39(11): 1066-1070.
- [11] LI Xiaofeng, LI Jinsha, CHANG Le, et al. Study on the relationship between noise factor and working voltage of microchannel plate[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0725002.
李晓峰, 李金沙, 常乐, 等. 微通道板噪声因子与工作电压关系研究[J]. 光子学报, 2020, 49(7): 0725002.
- [12] LI Xiaofeng, ZHANG Zhengjun, CONG Xiaoqing, et al. The influence of microchannel plate structure parameters on noise factor[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 0404001.
李晓峰, 张正君, 丛晓庆, 等. 微通道板结构参数对噪声因子的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 0404001.
- [13] GJB 2000A-2020, 像增强器通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [14] SHI Jifang. Study on night sky light simulated light source for performance evaluation of low light night vision system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
史继芳. 用于微光夜视系统性能评价的夜天光模拟光源研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [15] JIN Weiqi, ZHANG Qin, WANG Xia, et al. An improved line-of-sight model of direct-view low-light night vision system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(4): 0411001.
金伟其, 张琴, 王霞, 等. 一种改进的直视型微光夜视系统视距模型[J]. 光子学报, 2020, 49(4):0411001.

Research on Signal-to-noise Ratio of Low-light Level Image Intensifier Based on Night Sky Light Spectrum Matching

ZHANG Qin^{1,2}, BAI Xiaofeng^{1,2}, CHENG Hongchang^{1,2}, JIAO Gangcheng^{1,2}, LI Zhoukui^{1,2},
HAN Kun^{1,2}, LI Qi^{1,2}

(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)

Abstract: As an important performance index of the low-light-level image intensifiers, the signal-to-noise ratio can determine the detection limit under the low-light conditions. Therefore, an accurate evaluation of the signal-to-noise ratio is helpful to grasp actual working status of the low-light-level image intensifiers. In the photoelectric image transmission process, the quantum noise of the photocathode, the particle noise of the microchannel plate and the phosphor screen will add noise to the transmission chain of the image, thereby reducing the signal-to-noise ratio of the image. Laboratory testing methods for the signal-to-noise ratio of the low-light-level image intensifiers are relatively mature, and the photomultiplier tube is usually used as the core detection device to detect the signal and noise of the output light spot image. The test light source specified in the laboratory test of the signal-to-noise ratio is 2 856 K light source A. Due to the difference of spectral distribution between the night sky light and the light source A, the laboratory measurement results of the signal-to-noise ratio cannot accurately describe the signal-to-noise ratio of the low-light-level image intensifier under actual night sky light conditions, and the actual night sky light spectrum distribution is relatively complicated, which is difficult to be simulated by the laboratory test light source. In response to this problem, the theoretical calculation model of the output signal-to-noise ratio of the low-light-level image intensifier is deduced based on the photocathode and night light spectrum matching relationship and the theory of light quantum noise fluctuation. After verifying the model based on the parameters of the typical low-light image intensifier, the output signal-to-noise of the two under the radiation of three kinds of night sky light and test light source with the same illuminance is calculated based on the model. The comparative analysis results show that: 1) Under the radiation of three kinds of night sky

light, the actual signal-to-noise ratio of the super second and third generation image intensifiers is far greater than the test results under the radiation of test light source with the same illuminance in the laboratory. The reason is that compared with the light source A, the low-light image intensifier has a larger sensitivity conversion coefficient for the reflection spectrum of the actual grass scene. It further proves that the laboratory test results of the signal-to-noise ratio of the image intensifier cannot describe its actual working status under these three kinds of night sky light conditions; 2) Under the radiation of three kinds of night sky light, The difference in signal-to-noise ratio between the third generation and the super second generation is greater than the laboratory test difference, and this difference increases with the increase of illuminance. Therefore, the third-generation low-light image intensifier has a greater signal-to-noise ratio advantage in the actual working environment of the night sky light radiation. In addition, the theoretical calculation of the signal-to-noise ratio under extremely low illuminance levels is helpful to broaden the illuminance range for the evaluation of the signal-to-noise ratio. Under the condition of clear starlight, the illuminance of the reflected light from the actual scene reaching the cathode surface of the low-light night vision system is 10^{-5} lx. Under the condition of cloudless clouds, the actual illuminance of the photocathode surface even reaches the level of 10^{-6} lx. The current laboratory test conditions are difficult to describe the detection limit performance under these two conditions. Therefore, the theoretical calculation under the extremely low illuminance level of 10^{-6} lx helps to broaden the illuminance for the signal-to-noise ratio evaluation. The research in this thesis lays a theoretical foundation for the evaluation of the signal-to-noise ratio of the low-light-level image intensifiers under the night-sky radiation conditions where the spectral distribution is more complex. At the same time, it also theoretically discussed the signal-to-noise ratio under the extremely low illumination levels.

Key words: Low-light-level image intensifiers; Night radiation; Spectrum matching; Signal-to-noise ratio; A light source

OCIS Codes: 250.1500; 040.5160; 300.6550; 350.5610