

一种基于微光夜视系统下光电阴极探测的评价因子

胡朝龙 刘磊 钱芸生 莫涌超 拜晓锋 石峰

Evaluation factor for photocathode detection in low-level-light night vision system

HU Chaolong, LIU Lei, QIAN Yunsheng, MO Yongchao, BAI Xiaofeng, SHI Feng

引用本文:

胡朝龙, 刘磊, 钱芸生, 等. 一种基于微光夜视系统下光电阴极探测的评价因子[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 628–635. DOI: 10.5768/JAO202344.0304001

HU Chaolong, LIU Lei, QIAN Yunsheng, et al. Evaluation factor for photocathode detection in low-level-light night vision system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 628–635. DOI: 10.5768/JAO202344.0304001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微光夜视器件划代方法初探

Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices

应用光学. 2021, 42(6): 1092–1101 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0604001>

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

Test and analysis of factors influencing target contrast ratio based on 3rd generation LLL ICCD imaging device

应用光学. 2020, 41(6): 1241–1246 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0603004>

激光三角法中工作角对系统灵敏度的影响

Effect of working angle on system sensitivity in laser triangulation

应用光学. 2017, 38(5): 826–830 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507001>

船舶夜航光环境评价指标筛选

Screening of light environment evaluation indices for ship night navigation

应用光学. 2017, 38(5): 804–809 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0503005>

四通道微光偏振实时成像光学系统设计

Optical system design of four-channel low light level polarization imaging

应用光学. 2019, 40(2): 334–341 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205005>

基于图像分割和局部亮度调整的微光图像颜色传递算法

Low-light image color transfer algorithm based on image segmentation and local brightness adjustment

应用光学. 2020, 41(2): 309–317 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0628-08

一种基于微光夜视系统下光电阴极探测的评价因子

胡朝龙¹, 刘磊¹, 钱芸生¹, 莫涌超¹, 拜晓锋², 石峰²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 光谱匹配系数是微光夜视仪性能评估的重要参数, 但传统的光谱匹配系数只能反映出光电阴极在响应波长范围内与目标光谱的吻合程度, 并不能区分出不同代的光电阴极在微光夜视系统中的性能。因此, 结合初始对比度、光电阴极的积分灵敏度和光谱转换系数建立了一个评价因子方程, 用于描述光电阴极对探测景物的影响, 同时对目标与背景的初始对比度公式进行改进, 提高了初始对比度的准确性。计算超二代光电阴极材料 New S₂₅ 和三代光电阴极材料 GaAs 与不同景物的光谱匹配系数和评价因子, New S₂₅ 与景物的光谱匹配系数要大于 GaAs 与景物的光谱匹配系数, 证明了光谱匹配系数的局限性; GaAs 与景物的评价因子大于 New S₂₅ 与景物的评价因子, 证明了提出的评价因子能够更有效地评估微光夜视系统的性能。

关键词: 微光夜视系统; 光谱匹配系数; 初始对比度; 评价因子; 积分灵敏度

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0304001

Evaluation factor for photocathode detection in low-level-light night vision system

HU Chaolong¹, LIU Lei¹, QIAN Yunsheng¹, MO Yongchao¹, BAI Xiaofeng², SHI Feng²

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Low-Light-Level Night Vision Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: Spectral matching factor is an important parameter for the performance evaluation of the low-light-level (LLL) night vision system. However, the traditional spectral matching factor can only reflect the degree of coincidence between the spectrum of the photocathode and the target in the response wavelength range, and cannot distinguish the performance of different generations of photocathode in LLL night vision system. Therefore, an evaluation factor equation was established to describe the effect of the photocathode on the detected scene, combined with the initial contrast, the integrated sensitivity and the spectral conversion coefficient. Meanwhile, the initial contrast formula of the target and the background was improved to increase the accuracy of the initial contrast. The spectral matching factors and the proposed evaluation factors of a super-second generation photocathode material and a third generation photocathode material which named New S₂₅ and GaAs with different targets were calculated. The spectral matching factor between New S₂₅ and the target was greater than that between GaAs and the target, which proved the limitation of the spectral matching factor. The evaluation factor between GaAs and the target was greater than that between New S₂₅ and the target, which proved that the proposed evaluation factor could evaluate the performance of LLL night vision system more effectively.

Key words: low-level-light night vision system; spectral matching factor; initial contrast; evaluation factor; integral sensitivity

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-11-29

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金 (J20190102); 江苏省青蓝工程基金 (2017-AD41779)

作者简介: 胡朝龙 (1998—), 男, 硕士, 主要从事微光夜视系统的性能评估。E-mail: 18856871210@qq.com

通信作者: 刘磊 (1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事半导体光电发射材料设计与制备。E-mail: liu1133_cn@sina.com.cn

引言

夜间低照度下的目标检测在军事领域一直有着重要意义。微光夜视技术是在夜天光条件下, 光信息与电信信息的互相转换、处理、加强、显示过程实现的一门新的技术^[1]。在微光夜视技术的发展过程中, 微光夜视系统的性能评估一直是一个关键问题。

最早由 ROSE A 提出了基于光量子噪声与阈值信噪比理论构建了理想的成像系统探测模型, 将人眼观察视角、亮度、对比度三大要素和信噪比联系在一起^[2]。1977 年, Richard J C 等结合像增强器和光电阴极的光谱响应建立了经典微光成像系统的理论视距方程^[3]。1991 年, G E Giakoumakis 计算了常见的荧光粉和典型的光电阴极的光谱匹配系数, 还给出了典型的白炽灯和 He-Ne 激光以及人眼与荧光粉的匹配系数^[4]。2008 年, 张灿林等计算了两种背光照电子倍增 CCD 与景物反射光谱匹配系数^[5], 这两种 CCD 都使用的是三代光电阴极材料。2018 年, 刘乾坤计算了超二代光电阴极材料 Super S₂₅₁、Super S₂₅₂ 和 New S₂₅ 与绿色草木反射光谱的光谱匹配系数^[6], 说明了光谱匹配系数对微光夜视系统的影响。2022 年, 张琴等人计算了在三种夜天光环境下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^[7], 并得到了这几种夜天辐射条件下的积分灵敏度转换系数。

上述研究中, 光谱匹配系数可以反映出光电阴极的光谱响应与景物反射辐射光谱或光源辐射光谱的吻合程度, 但仅限于光谱层面上进行比较, 并不能直接反映出光电阴极探测景物的性能。本文通过比较超二代和三代微光夜视器件的光电阴极与景物的光谱匹配系数, 验证了匹配系数的局限性。针对这一问题, 本文结合光谱转换系数、背景与目标的初始对比度以及光电阴极的积分灵敏度, 建立了光电阴极的评价因子方程, 该评价因子公式可以反映出光电阴极探测景物的性能。传统的视距方程也可以反映出不同光电阴极的探测性能, 但该方程计算参数非常复杂, 评价因子方程简化了计算过程, 在比较不同光电阴极在探测景物性能方面更有优势。

1 光谱匹配系数

在微光夜视系统分析中, 光谱分布的影响是一个重要的方面, 良好的光谱匹配是保证和改善仪

器性能的重要途径。从目标到人眼的一系列组元中, 自然光源与人造光源、景物反射率、大气透过率、仪器的光电阴极直至人眼, 都有各自不同的光谱分布。其中, 光电阴极的光谱响应分布和目标的反射光谱分布之间的光谱匹配系数是一个重要的参数。

根据光电阴极的光谱响应特性曲线可以得到光谱响应率 S_λ , 将 S_λ 对其最大值 $S_{\max}$ 归一化, 可得相对光谱响应率为^[8]

$$S(\lambda) = \frac{S_\lambda}{S_{\max}} \quad (1)$$

此时, 光电阴极面接收的是夜天光经过目标反射后的辐射, 即:

$$P_\lambda = \rho_\lambda \cdot K_\lambda \quad (2)$$

式中: P_λ 为目标反射辐射光谱分布; ρ_λ 为目标的光谱反射系数, 它随波长 λ 而变化; K_λ 为夜天光辐射光谱分布。将目标的反射辐射光谱分布 P_λ 对其最大值 $P_{\max}$ 归一化, 则得其相对光谱分布为

$$P(\lambda) = \frac{P_\lambda}{P_{\max}} \quad (3)$$

由此, 定义光谱匹配系数^[9]

$$\alpha(S, P) = \frac{\int P(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int P(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

由光谱匹配系数表达式 (4) 可知, 它只与光电阴极的相对光谱响应率和目标的相对反射光谱分布有关。目标的相对反射光谱分布由式 (3) 可以获得, 这里取 λ 在 400 nm~1 000 nm 范围内对其最大值的归一化。光电阴极的光谱响应可以通过实验曲线获得。本文讨论的是 GaAs 和 New S₂₅ 光电阴极, New S₂₅ 是美国夜视实验室研制的多碱光电阴极^[6], 属于超二代光电阴极; GaAs 是标准三代光电阴极^[10]。它们的光谱响应曲线如图 1 所示。

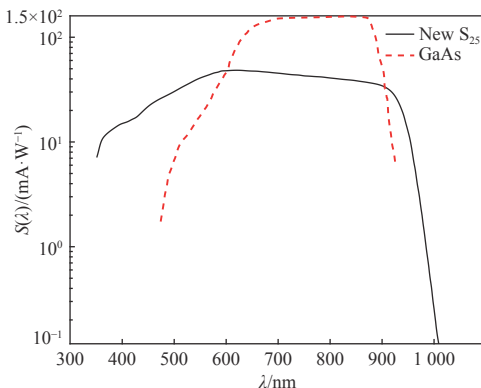


图 1 两种光电阴极的光谱响应曲线

Fig. 1 Spectral response curves of two photocathodes

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^[11]。

图2是满月光和晴朗星空下的夜天空光谱辐射曲线^[12]。图3是两种背景和三种目标的反射率曲线^[13],背景环境是山石和水泥路面,目标分别为涤纶军装、军用篷布和军用吉普车。通过表达式(2)可以计算出夜天光经过景物反射后的辐射光谱分布。

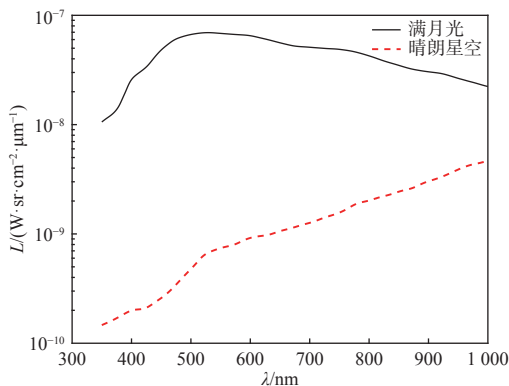


图2 满月光和晴朗星光的光谱辐射分布

Fig. 2 Spectral radiation distribution of full moonlight and clear starlight

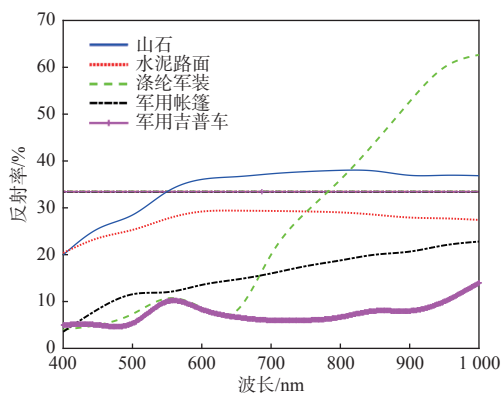
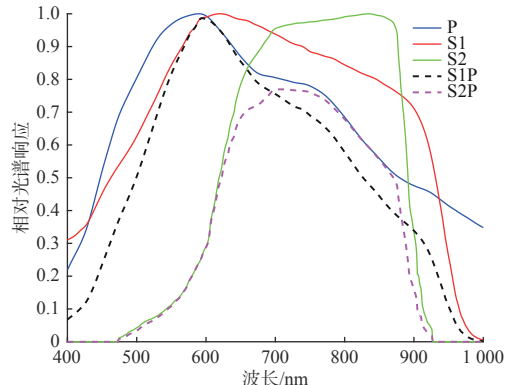


图3 不同景物的反射率曲线

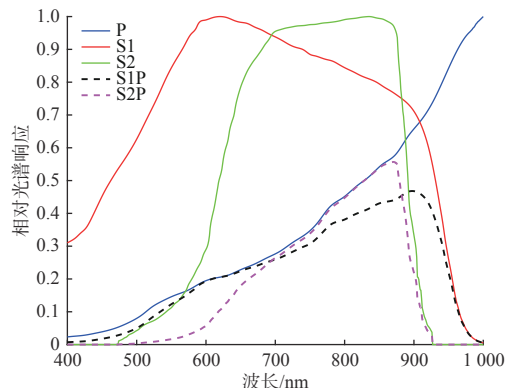
Fig. 3 Reflectance curves for different targets

通过公式(4)计算出不同夜天光环境下两种光电阴极材料与不同景物之间的光谱匹配系数。图4是山石背景的反射光谱与光电阴极的匹配结果。图5是涤纶军装反射光谱与光电阴极的匹配结果。图4、图5中,曲线S1和S2分别表示New

S₂₅和GaAs光电阴极相对光谱响应率,曲线P表示景物在满月光和晴朗星光下的相对反射光谱分布,则光谱匹配系数 $\alpha(S, t)$ 即为相应的曲线S·P与横坐标所包围的面积除以曲线P与横坐标所包围的面积的结果。从表1中可以看出:相同条件下,New S₂₅与景物反射光谱的匹配系数都要大于GaAs的匹配系数。原因是New S₂₅材料的光谱响应的半宽度要远大于GaAs光谱响应的半宽度,并且New S₂₅的光谱响应曲线在所选的光谱范围内更加平滑,GaAs只有在500 nm~900 nm范围内较为平滑。New S₂₅与景物在满月光时的光谱匹配系数都要远大于在晴朗星空时的光谱匹配系数,这是因为New S₂₅的光谱响应峰值波长离满月光下景物的反射光谱峰值波长更近,另外景物对月光的反射辐射曲线相比对晴朗星空的反射辐射曲线更加平坦。虽然在满月光时GaAs与景物的匹配系数基本大于在晴朗星空时的匹配系数,但差距不大,这是由于GaAs的光谱响应峰值波长在近红外范围内。



(a) 在满月光条件下



(b) 在晴朗星空条件下

图4 两种光电阴极与山石的光谱匹配系数

Fig. 4 Calculation of spectral matching factors between two types of photocathodes and rock

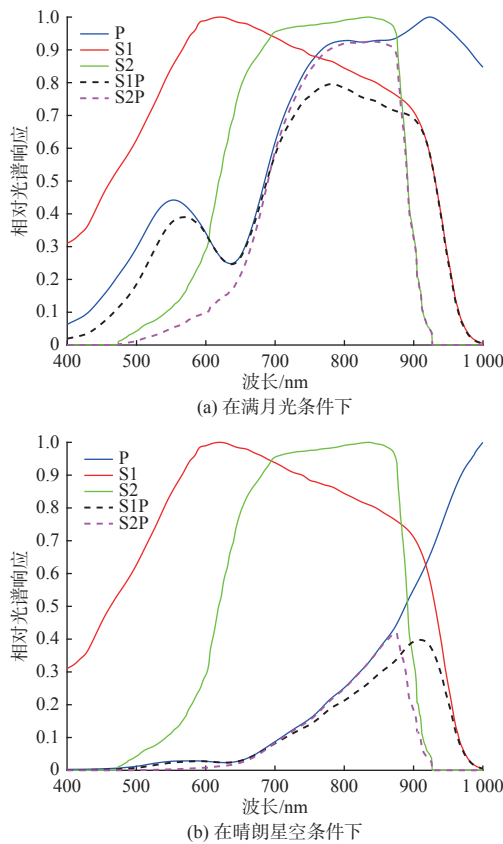


图5 两种光电阴极与涤纶军装的光谱匹配系数

Fig. 5 Calculation of spectral matching factors between two types of photocathodes and polyester military uniforms

表1 光谱匹配系数计算结果

Table 1 Calculation results of spectral matching factor

背景及目标	夜天光环境	光谱匹配系数 α	
		New S ₂₅	GaAs
山石	满月光	0.776 0	0.496 6
	晴朗星空	0.620 9	0.484 0
水泥路面	满月光	0.772 3	0.480 1
	晴朗星空	0.626 3	0.484 3
涤纶军装	满月光	0.697 2	0.552 8
	晴朗星空	0.503 6	0.385 8
军用篷布	满月光	0.763 1	0.519 6
	晴朗星空	0.581 5	0.453 8
军用吉普车	满月光	0.753 6	0.433 7
	晴朗星空	0.545 5	0.392 5

光谱匹配系数可以体现出光电阴极在波长范围内与景物的反射光谱的吻合程度,光谱匹配系数越大,两者之间的吻合程度越高。光电阴极的响应范围应与景物的光谱辐射波段尽量保持一致,如果匹配系数为0,则两者的响应范围完全没有重合,则该光电阴极对该光源没有探测能力。

根据表1中光谱匹配系数的计算结果,我们可以得到超二代光电阴极比三代光电阴极与景物反射光谱的吻合程度更好,但是并不能说明New S₂₅在探测景物上的性能比GaAs探测性能好。事实上,在微光成像系统中三代光电阴极比超二代光电阴极的性能好得多,这就体现出了光谱匹配系数的局限性,在同一代光电阴极材料中通过计算光谱匹配系数可以反映出它们性能的差异,因为同一代光电阴极的积分灵敏度差距并不大。可是不同代的光电阴极的积分灵敏度差异很大,三代光电阴极的积分灵敏度显著大于超二代光电阴极的积分灵敏度,因此,比较不同代的光电阴极与景物反射光谱的匹配系数并没有实际意义。想要直观地看出不同光电阴极探测景物的性能,需要结合光电阴极的其他参数提出一种新的评价因子方程。

2 光电阴极的评价因子

文献[14]中微光像增强器的空间分辨率公式为

$$A_k = 0.716 \times 10^3 \times \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\phi_{\min} f'_0 \beta(G)} \left(\frac{S_A \alpha_\lambda t \varepsilon \bar{\rho} E_0 \tau_0 \tau_d}{F_\phi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: C_0 是背景与目标的初始对比度; C_d 是大气对比衰减系数; $M(A_k)$ 为全系统对应空间频率为 A_k 时的调制传递函数; $\phi_{\min}$ 是阈值信噪比; f'_0 是物镜焦距; $\beta(G)$ 是亮度增益修正系数; D 是物镜直径; τ_0 是物镜的透过率; τ_d 是大气透过率; E_0 是夜空天空照度; S_A 是光电阴极的积分灵敏度; α_λ 是标准光源转换到景物反射辐射的光谱转换系数; t 是系统累积时间; ε 是目标长宽比; $\bar{\rho}$ 是背景和目标所对应的平均反射率; F_ϕ 是噪声功率因子。

式(5)的参数中与光电阴极相关的有背景与目标的初始对比度 C_0 、光电阴极的积分灵敏度 S_A 和标准光源转换到景物反射辐射的光谱转换系数 α_λ 。因此建立一个关于光电阴极的评价因子,需要结合3个参数进行计算,定义光电阴极的评价因子 δ 为

$$\delta = C_0 (S_A \alpha_\lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

转换系数 α_λ 有如下表示:

$$\alpha_\lambda = \frac{\bar{\alpha}(S, t) \cdot \alpha(e, A)}{\alpha(S, A) \cdot \bar{\alpha}(e, t)} \quad (7)$$

式中 $\alpha(S, A)$ 和 $\alpha(e, A)$ 分别为[14]

$$\alpha(S, A) = \frac{\int A(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int A(\lambda) d\lambda}, \alpha(e, A) = \frac{\int A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int A(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

式中 $A(\lambda)$ 表示标准光源的相对光谱辐射通量。

式(7)中 $\bar{\alpha}(S, t)$ 是光电阴极与景物的光谱匹配系数(光电阴极与目标光谱匹配系数 $\alpha(S, t_1)$ 和光电阴极与背景光谱匹配系数 $\alpha(S, t_2)$ 的平均值):

$$\bar{\alpha}(S, t) = \frac{\alpha(S, t_1) + \alpha(S, t_2)}{2} \quad (9)$$

式(7)中 $\bar{\alpha}(e, t)$ 是光适应人眼与景物的光谱匹配系数(光适应人眼与目标光谱匹配系数 $\alpha(e, t_1)$ 和光适应人眼与背景光谱匹配系数 $\alpha(e, t_2)$ 的平均值):

$$\bar{\alpha}(e, t) = \frac{\alpha(e, t_1) + \alpha(e, t_2)}{2} \quad (10)$$

$\alpha(e, t_1)$ 和 $\alpha(e, t_2)$ 分别为

$$\alpha(e, t_1) = \frac{\int P(\lambda)_1 V(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda)_1 d\lambda}, \alpha(e, t_2) = \frac{\int P(\lambda)_2 V(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda)_2 d\lambda} \quad (11)$$

式中 $V(\lambda)$ 为光适应人眼的相对视见函数。

光电阴极对标准光源的积分灵敏度 S_A 有如下表示^[15]:

$$S_A = \frac{1000 S_m \int A(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{683 \int A(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

式中 S_m 为光电阴极的光谱响应峰值。

背景与目标的初始对比度 C_0 有如下表示^[15]:

$$C_0 = \frac{|\int P(\lambda)_1 S(\lambda) d\lambda - \int P(\lambda)_2 S(\lambda) d\lambda|}{\int P(\lambda)_1 S(\lambda) d\lambda + \int P(\lambda)_2 S(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

公式(13)并不能准确地表达目标与背景的初始对比度,该表达式的数学意义为两条曲线与坐标轴的面积之差除以面积之和,这种方式并不能体现出两条曲线的对比度,可能会存在两条曲线不重合,但与坐标轴围成的面积却相等的情况。如图6所示,如果利用公式(13)求图中两条曲线的对比度,则得到的结果应该是:

$$C_0 = \frac{|(S_1 + S_2) - (S_3 + S_2)|}{(S_1 + S_2) + (S_3 + S_2)} = 0 \quad (14)$$

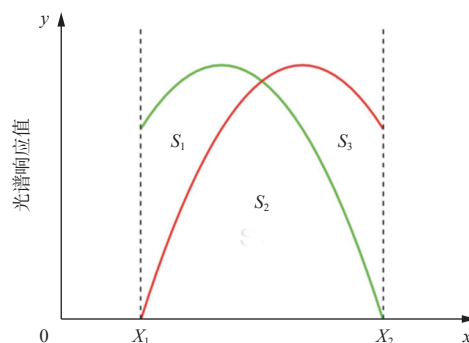


图6 两条假设的光谱曲线

Fig. 6 Two hypothetical spectral curves

此时得到的对比度是0,但是两条曲线并不重合,显然公式(13)并不能准确表示出不同曲线的对比度。因此本文对目标与背景的初始对比度公式进行了改进,即:

$$C_0 = \frac{\int |P(\lambda)_1 S(\lambda) - P(\lambda)_2 S(\lambda)| d\lambda}{\int P(\lambda)_1 S(\lambda) d\lambda + \int P(\lambda)_2 S(\lambda) d\lambda} \quad (15)$$

通过公式(15)求图6中两条曲线的对比度,得到的结果是:

$$C_0 = \frac{S_1 + S_3}{(S_1 + S_2) + (S_3 + S_2)} = \frac{S_1 + S_3}{S_1 + 2S_2 + S_3} \quad (16)$$

此时得到的结果可以表示两条曲线的对比度,体现出了两条曲线的差异性。在满月光时用表达式(13)计算GaAs光电阴极作用于山石与涤纶军装的初始对比度为0.0072,用改进后的表达式(15)计算得到的结果为0.2201。说明初始对比度的计算结果明显变大,更符合实际情况。

将公式(7)、公式(12)、公式(15)带入表达式(6)中并进行化简,为方便计算可以去掉常数项,对评价因子没有影响。微光夜视器件中光电阴极对景物探测性能的评价因子表达式如下:

$$\delta = C_0 \left(S_m \frac{\bar{\alpha}(S, t)}{\bar{\alpha}(e, t)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

相对视见函数是人眼对不同频率的光的视觉敏感程度。 $\bar{\alpha}(e, t)$ 的计算需要使用相对视见函数。图7显示了两种情况下的相对视见函数^[16]。因为微光夜视器件是在低照度环境中工作,因此本文选用暗视觉的相对视见函数计算光适应人眼与景物的光谱匹配系数。

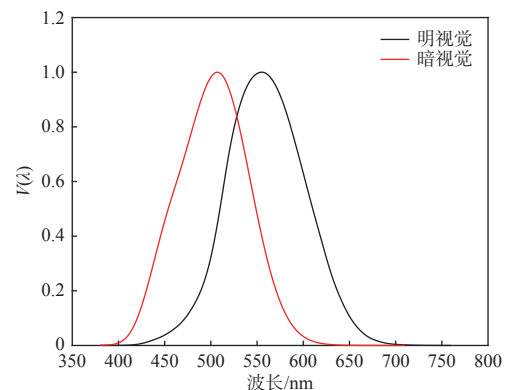


图7 人眼对光适应的相对视见函数

Fig. 7 Relative visual function of light adaptation to human eyes

根据公式(17)分别计算出满月光和晴朗星空条件下不同光电阴极与景物之间的评价因子,得到表2~表5的计算结果。

表 2 满月光条件下 New S₂₅ 光电阴极的评价因子

Table 2 Evaluation factors of New S₂₅ photocathode under full moonlight conditions

参数	山石			水泥路面		
	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车
$\bar{\alpha}(S,t)$	0.7366	0.7696	0.7648	0.7348	0.7677	0.7630
$\bar{\alpha}(e,t)$	0.1333	0.1739	0.1922	0.1407	0.1813	0.1996
C_0	0.3002	0.0786	0.1756	0.3189	0.0935	0.1707
δ	5.4662	1.2808	2.7133	5.6450	1.4903	2.5852

表 3 晴朗星空条件下 NewS₂₅ 光电阴极的评价因子

Table 3 Evaluation factors of New S₂₅ photocathode under clear starlight conditions

参数	山石			水泥路面		
	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车
$\bar{\alpha}(S,t)$	0.5623	0.6012	0.5832	0.5650	0.6039	0.5859
$\bar{\alpha}(e,t)$	0.0253	0.0350	0.0409	0.0278	0.0375	0.0434
C_0	0.3072	0.1220	0.3027	0.3264	0.1430	0.3220
δ	11.2181	3.9166	8.8539	11.3980	4.4451	9.1643

表 4 满月光条件下 GaAs 光电阴极的评价因子

Table 4 Evaluation factors of GaAs photocathode under full moonlight conditions

参数	山石			水泥路面		
	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车
$\bar{\alpha}(S,t)$	0.5247	0.5081	0.4652	0.5165	0.4999	0.4569
$\bar{\alpha}(e,t)$	0.1333	0.1739	0.1922	0.1407	0.1813	0.1996
C_0	0.2201	0.0998	0.2255	0.2363	0.1192	0.2072
δ	5.3357	2.0844	4.2867	5.5320	2.4185	3.8305

表 5 晴朗星空条件下 GaAs 光电阴极的评价因子

Table 5 Evaluation factors of GaAs photocathode under clear starlight conditions

参数	山石			水泥路面		
	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车	涤纶军装	军用篷布	军用吉普车
$\bar{\alpha}(S,t)$	0.4349	0.4689	0.4383	0.4351	0.4691	0.4384
$\bar{\alpha}(e,t)$	0.0253	0.0350	0.0409	0.0278	0.0375	0.0434
C_0	0.3150	0.1215	0.3385	0.3305	0.1386	0.3538
δ	15.9579	5.4339	13.5398	15.9762	5.9898	13.7397

对比表 2~表 5 的数据可以发现大部分情况下 GaAs 的评价因子都要大于 New S₂₅, 这是因为三代光电阴极 GaAs 的最大光谱响应要远远大于超二代光电阴极 New S₂₅ 的最大光谱响应, 并且 GaAs 的积分灵敏度也同样大于 New S₂₅ 的积分灵敏度。

通过结合背景与目标的初始对比度、光电阴

极的积分灵敏度和光谱匹配系数构建的评价因子方程, 考虑了在微光成像系统中所有光电阴极相关的参数, 这使评价因子更具严谨性。相关研究表明, 在不同夜天光环境下超二代的识别距离都明显逊色于三代^[16]。通过计算不同光电阴极与景物反射光谱的评价因子, 可以看出评价因子的大小符合光电阴极探测景物性能的规律, 即三代光

电阴极在探测景物的性能上要优于超二代光电阴极的探测性能。所以, GaAs 与景物反射光谱的评价因子大于 New S₂₅ 与景物反射光谱的评价因子是准确的, 在微光成像系统中评价因子可以用来作为光电阴极探测性能的判断依据。

3 结论

本文对两种光电阴极材料和不同景物进行了光谱匹配系数计算, 改进了目标与背景的初始对比度公式, 并在微光夜视系统下建立了一个光电阴极的评价因子, 用来描述不同光电阴极材料对探测目标的性能。通过对比分析发现以下结论。

1) New S₂₅ 光电阴极与景物在满月光下的光谱匹配系数都要大于晴朗星光下的情况。这是因为在满月光下景物反射光谱的峰值波长离 New S₂₅ 光谱响应峰值波长较近, 而景物在晴朗星光下的反射光谱的峰值波长远大于该光电阴极的光谱响应峰值波长。GaAs 的光谱响应峰值波长在近红外范围内, 因此 GaAs 与景物的光谱匹配系数在两种夜天光条件下差距不大。

2) New S₂₅ 光电阴极在任何一种情况下的光谱匹配系数都大于 GaAs。这是因为 New S₂₅ 光谱响应在所选取的光谱范围内要平坦得多, 而 GaAs 只在 650 nm~900 nm 之间有较高的响应, 其余部分下降很快。因此 New S₂₅ 光电阴极与景物反射光谱的匹配效果更好。不过三代光电阴极比超二代光电阴极在探测性能上更好, 这反映出了光谱匹配系数的局限性。对不同代的光电阴极与景物反射光谱的匹配系数进行比较, 并不能说明光谱匹配系数大的光电阴极探测性能就更好。

3) 在相同条件下 GaAs 的评价因子普遍大于 New S₂₅ 的评价因子, 这是因为 GaAs 光电阴极的积分灵敏度要远大于 New S₂₅ 的积分灵敏度, 且 GaAs 的峰值光谱灵敏度要大于 New S₂₅ 的峰值光谱灵敏度。这说明了三代光电阴极性能优于超二代光电阴极, 验证了评价因子的可靠性。通过对比不同的光电阴极的评价因子, 可以直接比较出光电阴极探测性能的优劣, 并且比计算视距公式要简单得多。

微光夜视仪的发展必然离不开光电阴极材料的进步, 给出了光电阴极的发展方向, 未来的光电阴极的光谱响应应该有较大的半宽度, 并且光谱响应应该向近红外波段靠近, 可以与景物得到更

好的匹配系数。另外, 通过光电阴极的评价因子公式可以看出, 想要提高评价因子, 就需要光电阴极有更高的积分灵敏度和峰值光谱灵敏度。

参考文献:

- [1] 程宏昌, 石峰, 李周奎, 等. 微光夜视器件划代方法初探[J]. *应用光学*, 2021, 42(6): 1092-1101.
CHENG Hongchang, SHI Feng, LI Zhoukui, et al. Preliminary study on distinguishment method of low-level-light night vision devices[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(6): 1092-1101.
- [2] ROSE A. The sensitivity performance of the human eye on an absolute scale[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(2): 196-208.
- [3] RICHARD J C, LAMPORT D L, ROAUX E, et al. Performances des system, de vision nocturne passive utilisant des tubes intensificateurs d'images influence de la response spectrale de la photo-cathode[J]. *Acta Electron*, 1977, 20(4): 353-368.
- [4] GIAKOUMAKIS G E. Matching factors for various light-source—Photodetector combinations[J]. *Applied Physics A*, 1991, 52(1): 7-9.
- [5] 张灿林, 陈钱. 背照明电子倍增CCD与景物反射光谱匹配系数的研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(2): 166-169.
ZHANG Canlin, CHEN Qian. Matching coefficients for BV-EMCCD and reflective radiation spectra of objects[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 166-169.
- [6] 刘乾坤. 微光夜视成像系统探测阈值评估理论及仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
LIU Qiankun. Evaluation theory and simulation of detection threshold of low-light-level night vision imaging system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [7] 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): 173-181.
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): 173-181.
- [8] LIU Q K, LIU L, DENG Y B, et al. Apparent distance theory revision for low-light-level night vision system based on noise factor[J]. *Optical and Quantum Electron-*

- ics, 2017, 49(7): 249.
- [9] 张俊举, 杨文彬, 许辉, 等. 人体目标光谱特性对微光像增强器视距的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(11): 3066-3070.
- ZHANG Junju, YANG Wenbin, XU Hui, et al. Influence of human body target's spectral characteristics on visual range of low light level image intensifiers[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(11): 3066-3070.
- [10] 杜玉杰, 杜晓晴, 常本康. 国外GaAs光电阴极光谱响应特性比较与分析[J]. *红外技术*, 2005, 27(3): 254-256.
- DU Yujie, DU Xiaoqing, CHANG Benkang. Compare and analysis of spectral response characteristics of foreign GaAs photocathodes[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(3): 254-256.
- [11] 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): 143-150.
- LI Xiaofeng, ZHANG Zhengjun, CONG Xiaoqing, et al. Influence of microchannel plate structure parameters on noise factor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 143-150.
- [12] 尹丽菊, 陈钱, 张灿林. 雪崩光电二极管的光谱响应特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 37-41.
- YIN Liju, CHEN Qian, ZHANG Canlin. Spectral response characterization of avalanche photodiode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 37-41.
- [13] 周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 65-66.
- ZHOU Liwei. Target detection and identification[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2004: 65-66.
- [14] 刘磊, 李元, 钱芸生, 等. 用于微光夜视系统性能评估的新方法[J]. *应用光学*, 2006, 27(6): 546-551.
- LIU Lei, LI Yuan, QIAN Yunsheng, et al. New method for visual range evaluation and scene simulation of low-light-level(LLL) night vision systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, 27(6): 546-551.
- [15] 刘磊. 激光助视/微光夜视系统视距评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- LIU Lei. Visual range evaluation of LLL night vision system with laser illuminator[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [16] 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): 61-70.
- JIN Weiqi, ZHANG Qin, WANG Xia, et al. An improved apparent distance model for direct-viewlow-light-level night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 61-70.