

引用格式: JIN Wei-qi, ZHANG Qin, WANG Xia, *et al.* An Improved Apparent Distance Model for Direct-view low-light-level 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

一种改进的直视型微光夜视系统视距模型

金伟其,张琴,王霞,李力,裘溯

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

摘 要:针对经典视距模型对于三代与超二代像增强器的直视型微光夜视系统评价方面缺乏差异性,模拟仿真结果在 10^{-4} lx 超低照度下不甚理想这一问题,对现有的经典视距模型进行了三个方面的优化:在系统的传递函数模型加入了人眼的传递函数;基于光阴极与景物的光谱匹配修正了景物在光阴极产生的平均光电子数和光电子对比度公式;在噪声来源中加入了背景噪声项,进而推导出改进的视距模型,并通过头盔系统的实际外场实验结果进行了验证.结果表明,改进的视距模型能有效分辨出超二代和三代夜视系统的识别距离的差异,计算结果更接近实际测量结果.

关键词:直视型微光夜视系统;经典视距模型;人眼传函;光谱匹配;暗背景噪声

中图分类号:TN223

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204904.0411001

An Improved Apparent Distance Model for Direct-view low-light-level Night Vision System

JIN Wei-qi, ZHANG Qin, WANG Xia, LI Li, QIU Su

(MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: There is no difference in the evaluation of the direct-view low-light-level night vision system for the three-generation and super-second generation image intensifiers. The simulation results are not ideal under the ultra-low illumination of 10^{-4} lx. Therefore, three optimizations were made for the model: the transfer function of the human eye was added into the transfer function model of the system; the average photoelectron number and photoelectron contrast formula generated by the scene at the photocathode were corrected based on the spectral matching between the scene and the photocathode; the background noise term was added to the noise source. The improved apparent distance model was verified by the experimental results of the helmet system in field conditions. The results show that the improved model can effectively distinguish the difference between the recognition distances of the super-second generation and three-generation night vision systems, the calculation results are closer to the actual measurement results.

Key words: Direct-view low-light-level night vision system; Classic visual distance detection model; Spectral matching; Human eye transmission; Dark background noise

OCIS Codes: 110.4100; 250.1500; 330.1800

0 引言

以像增强器为核心的直视型微光夜视系统是夜视技术的一大重要分支,并随各代像增强器技术的发展

基金项目:微光夜视技术重点实验室基金(No.J20160101)

第一作者:金伟其(1961-),男,教授,博士,主要研究方向为夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等.Email:jinwq@bit.edu.cn

收稿日期:2019-12-13;录用日期:2020-01-20

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

不断发展.直视型微光夜视系统一般由物镜、像增强器、目镜以及人眼构成,系统成像性能不仅取决于各分系统的性能,人眼与微光夜视系统的匹配状态也直接影响系统成像性能^[1].

作用(探测和识别)距离是评价直视型微光夜视系统性能的综合指标,在系统性能评价以及设计过程中具有重要的作用.1948年 ROSE A 提出了基于光量子噪声与阈值信噪比理论的理想成像系统探测模型^[2],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;1954年 DEVRIES H L 对 ROSE A 模型的对比度等参量进行了修正得到了改进的探测模型^[3].1960年 COLTMNA J W^[4],1969年 RIEHARDS E A^[5],1975年 SEHAGEN P^[6]等分别做了有益的完善,并给出了相应的理想探测模型.然而,过于理想的模型条件给应用带来了很大的局限性.为此, SCHNITZLER A D、ROSELL F A、RICHARD J C 等先后于 1971~1982 年间考虑了实际对比度修正、引入微通道板的系统信噪比以及噪声因子等影响因素,建立了趋近实际的视距模型^[7-9].国内研究人员在 1982~2002 年间对理想成像探测模型做了相应的修改和完善,给出了各自的视距模型^[10-12].2003 年南京理工大学常本康和刘磊等综合考虑了实际目标与背景的反射辐射积分灵敏度、对比度衰减及像增强器噪声功率因子等影响,建立了目前国内行业普遍使用的修正经典视距计算模型(以下简称工业视距模型)^[13-15],并对二代和超二代微光夜视系统取得了较一致的预测效果.

随着三代微光夜视技术的发展,工业视距模型出现了一些预测偏差,特别是在 10^{-4} lx 超低照度下偏差更为明显.分析其原因大致有几个方面:1)不同环境状况下夜天光谱的变化和像增强器光阴极光谱响应的变化,对此一直有像增强器与夜天光谱匹配系数的研究^[16-17];2)人眼视觉在成像过程的作用,对此 1981 年 LLOYD J M 在热成像系统性能评价中就有讨论^[18],近年来美国 TTP 评价模型^[19]及国内的一些研究^[20-21]也都逐渐考虑光电成像系统与人眼视觉一体化的方法,需要从人眼视觉传递函数以及信噪比匹配的角度开展评价方法的研究,通常采用传递函数积分的参数(类似信道宽度)进行评价.

本文针对低于 10^{-3} lx 的超低照度条件下直视型微光夜视系统作用距离评价问题,结合微光夜视系统与人眼的匹配状态以及人眼传递特性,对工业视距模型进行修改完善,并通过实验数据进行验证.本文研究对于超低照度条件下直视型微光夜视系统的优化设计具有指导意义.

1 直视型微光夜视系统性能评价的几个补充修正因素

如图 1 所示,直视型微光夜视系统的角放大率 Γ 定义为

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\beta \frac{f'_o}{f'_e} \quad (1)$$

式中, $2\omega'$ 为像方视场角; 2ω 为物方视场角; $\beta = D_s/D_c$ 为像增强器的横向放大率; D_c 和 D_s 分别为光阴极面和荧光屏有效工作直径; f'_o 和 f'_e 分别为物镜和目镜焦距.

在传统模型中只考虑到目镜输出端,把人眼-脑仅看成一个简单的信号接收器.而实际上整个成像信息链路还应包含人眼-脑环节,其不仅包含人眼传递特性,也包含人眼-脑的信号处理特性.

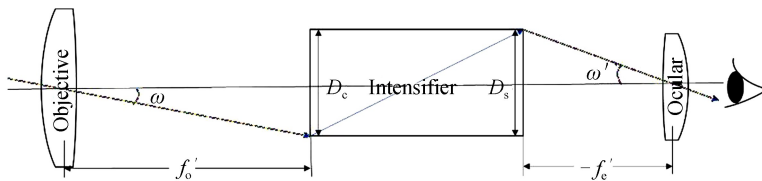


图 1 直视型微光夜视系统
Fig.1 Direct-view low-light night vision system

于是,直视型微光夜视系统的传递函数 $MTF_s(f)$ 可表示为

$$MTF_s(f) = MTF_o(f) \cdot MTF_t(f) \cdot MTF_e(f/\Gamma) \quad (2)$$

式中, $MTF_o(f)$ 和 $MTF_e(f)$ 是物镜和目镜传递函数; $MTF_t(f)$ 是像增强器传递函数; Γ 是系统角放大率.直视型微光夜视系统与人眼-脑构成的整体系统传函 $MTF_H(f)$ 为

$$MTF_H(f) = MTF_s(f) \cdot MTF_{eye}(f/\Gamma) \quad (3)$$

式中, $MTF_{eye}(f)$ 是人眼的传递函数.

本文将从人眼传递函数、目标场景与光电阴极的光谱匹配、以及超低照度下像增强器的背景等效照度等

方面考虑系统距离模型的变化.

1.1 人眼传递函数

目前人眼传递函数主要有低通型和带通型滤波器两类,前者以较为简单的高斯型、指数型以及 Watanabe 模型为代表,但未考虑人眼神经系统在低频区的抑制作用;后者以 Nill 模型、Batern 模型、Campell 模型以及复合模型为代表^[22-23],考虑了视神经的抑制作用,可更全面的描述人眼视觉特性.传统模型中人眼传递函数模型采用忽略极低频率的指数型或高斯型低通滤波器模型,在基于传递函数积分的信道宽度评价中存在明显的偏差^[24],因此需要考虑包含极低频的带通滤波器模型.

由于人眼视觉特性与目标场景亮度有关,对于直视微光夜视系统,人眼通过目镜观看像增强器荧光屏(常用 P43 和 P20 荧光粉)图像,亮度增益在超低照度下可达到 20 000,通常在环境照度为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ lx 量级下,观察荧光屏的亮度通常处于人眼中间视觉模式.本文选取的复合视觉模型

$$MTF_{eye}(f) = M \frac{1}{K\sqrt{2}} \left\{ \left[\frac{1}{\eta_s P E_e} + \frac{\Phi_0}{1 - \exp(-f^2/f_0^2)} \right] \left[\frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{X_e^2} + \left(\frac{f}{N_e} \right)^2 \right] \right\}^{-0.5} M_{opt}(f) \quad (4)$$

式中, M 是归一化常量; K 是阈值常量; T 和 η_s 分别是人眼积分时间(s)和量子效率; Φ_0 是在高频区域的噪声谱密度(sec deg^2); ω 是目标视场角(deg); X_e 和 N_e 是人眼积累目标图像信息最大视场角(deg)和最大角周期(cyc); $M_{opt}(f) = \exp(-2\pi^2\sigma_e^2 f^2)$ 是人眼光学系统传递函数的高频部分, $\sigma_e = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{sph} d^3)^2}$ 是光学标准偏差, σ_0 是常数(deg), C_{sph} 是球差系数(通常取 10^{-4} deg/mm³); P 是由物理量和光度量决定的常量(photons/(td sec deg²)),定义为

$$P = \begin{cases} \Psi \times 3600 \times \lambda / V(\lambda) & \text{Monochromatic light} \\ \Psi \times 3600 \times \frac{\int P(\lambda) V(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} & \text{Non-monochromatic light} \\ 1.285 \times 10^6 & \text{White light} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $V(\lambda)$ 为对应人眼视觉的相对光谱光视效能; $P(\lambda)$ 为图像的光谱辐射分布 $\Psi = \begin{cases} 0.6270 & \text{Photopic vision} \\ 0.2442 & \text{Scotopic vision} \end{cases}$.

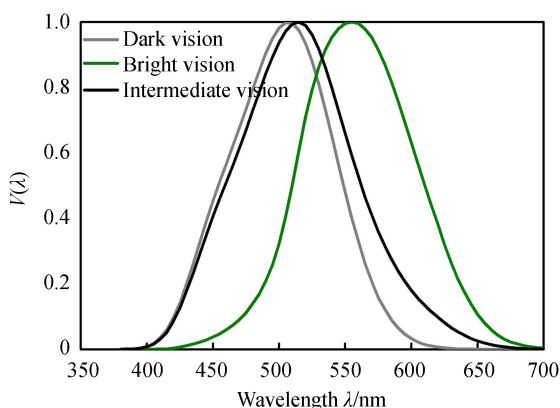


图2 P43 荧光屏显示的人眼中间视觉响应

Fig.2 Human eye intermediate visual response when P43 screen displays

按照 2010 年 CIE191 推荐的中间视觉模型 MES2^[25] ($0.005 \sim 5$ cd/m²), 计算对应常见 P20 和 P43 荧光屏亮度下人眼中间视觉光谱光视效率, 图 2 给出了 P43 荧光屏在亮度约为 0.0744 cd/m² 时人眼中间视觉光谱光视效率.

式(4)中 E_e 是视网膜上的照度(lx), 定义为

$$E_e = \pi d^2 L / 4 \quad (6)$$

式中, L 是显示器亮度, 单位为 foot-lamberts ($= 3.43$ cd/mm²); d 是与显示屏亮度 L 有关的瞳孔直径

$$d = \begin{cases} -9.011 + 13.25 \exp\left(\frac{\log L}{21.082}\right) & \text{Monocular observation} \\ -9.511 + 13.25 \exp\left(\frac{\log L}{21.082}\right) & \text{Binocular observation} \end{cases} \quad (7)$$

式(4)的其它常数如表 1 所示.

表 1 复合视觉模型中的几个常数

Table 1 Several constants in the composite vision model

T/sec	X_e/deg	N_e/cyc	$\Phi_0/(\text{sec deg}^2)$	$f_0/(\text{cyc} \cdot \text{deg}^{-1})$	K	σ_0/deg
0.1	12	15	3×10^{-8}	8	4	0.013 7

1.2 光阴极的平均光电子数和光电子对比度

夜天空辐射包含了月光、星光、大气辉光等多种自然辐射源,图 3 为目前标准满月光和晴朗星光的辐射光谱分布曲线.夜天空辐射在有月和无月的情况下呈现不同的光谱分布:满月晴朗天气条件的夜天辐射主要取决于月光的光谱分布;无月晴朗天气条件的星光和大气辉光为主要成分,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取决于星光的光谱分布^[26],理想夜天辐射可以等效为满月光和星光的光谱辐射的线性组合,根据满月晴朗、1/4 月晴朗、无月晴朗等条件下的地面照度(分别为 $2 \times 10^{-1} \text{ lx}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ lx}$ 和 $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$)^[26],拟合出相应的辐射光谱分布,如图 4 所示.

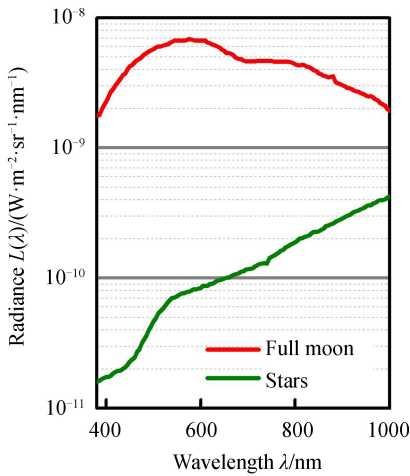


图 3 满月光和晴朗星光的辐射光谱分布

Fig.3 Radiation spectral distribution of full moonlight and clear starlight conditions

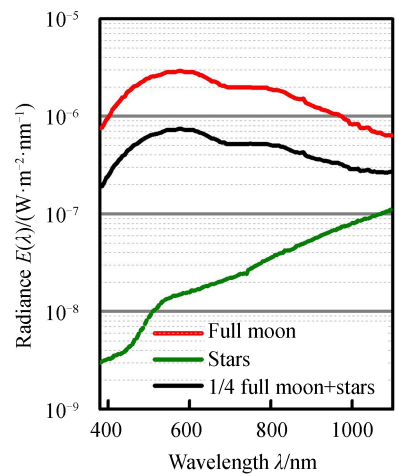


图 4 三种自然条件的天空辐亮度分布曲线

Fig.4 Radiance distribution curve of three natural

图 5 是典型景物草地和绿色迷彩的光谱反射率曲线.图 6 给出了典型超二代和三代光电阴极光谱灵敏度曲线^[27],进而可以计算出二者在 3 种典型夜天辐射条件下的光谱反射辐照度曲线如图 7 所示.

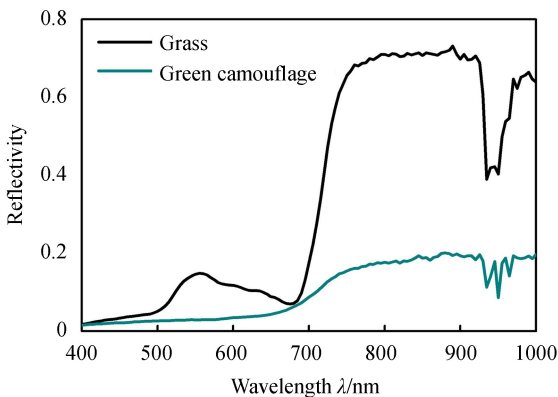


图 5 草地和绿色迷彩的光谱反射率

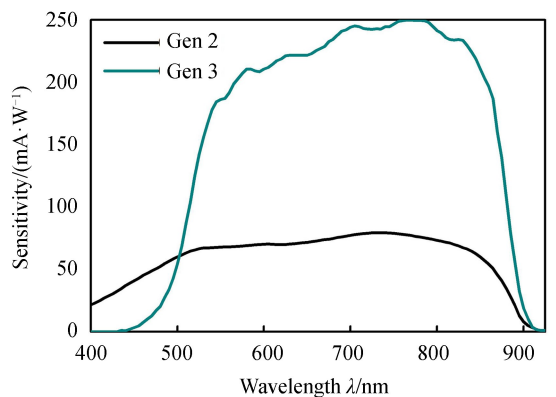


图 6 超二代和三代的阴极光谱灵敏度

Fig.5 Spectral reflectance of grass and green camouflage

Fig.6 The cathode spectral sensitivity of Gen2 and Gen3

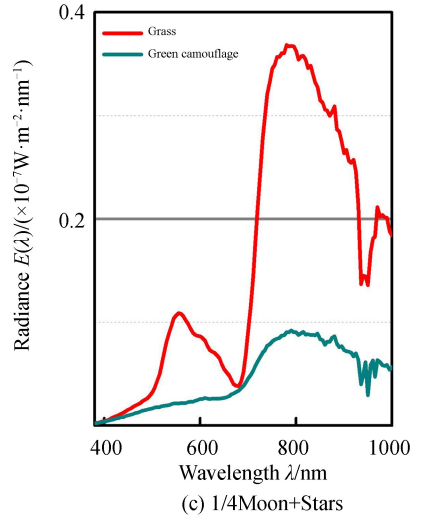
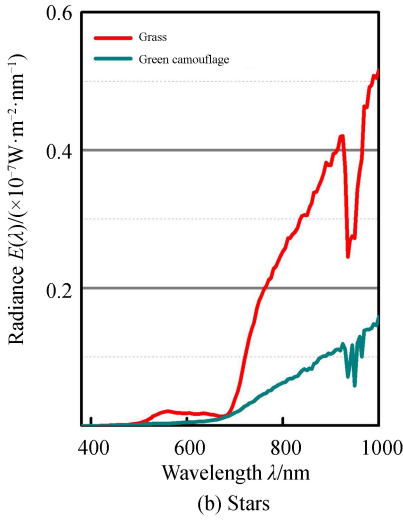
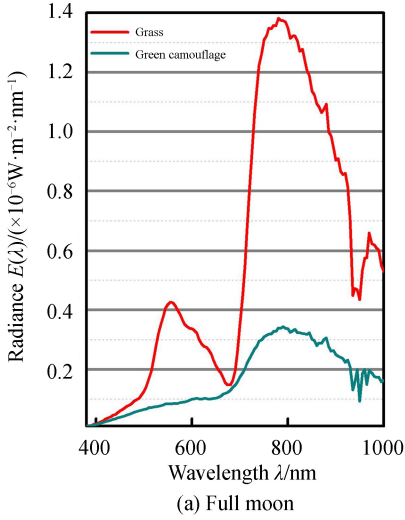


图 7 三种夜天辐射条件下的景物光谱反射辐照度

Fig.7 Spectral reflection irradiance of three kinds of night radiation conditions

对于微光像增强器,由于光谱灵敏度(lm/W)是在实验室针对标准 A 光源测定的结果

$$S_A = \frac{\int_0^\infty P_A(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty P_A(\lambda)d\lambda} \frac{S_m}{K_A} = \frac{\alpha(S, P_A)S_m}{K_A} \quad (8)$$

式中, $P_A(\lambda)$ 为 A 光源的相对单色辐射功率; $S(\lambda)$ 为光阴极相对光谱响应率; S_m 为光阴极光谱响应率最大值($\mu A/W$); K_A 为景物反射光的光视效能; $\alpha(S, P_A)$ 为光阴极与 A 光源的光谱匹配系数。

假设目标与背景($x=T, B$)反射光谱辐照度到达光阴极面的分布为 $E_x(\lambda)$ 时,光阴极单位面积产生的光电子数为

$$n_x = \frac{S_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_x(\lambda)S(\lambda)d\lambda}{e} = \frac{S_A \alpha(S, E_x) K_A}{e \alpha(S, E_A) K_x} E_x = \frac{S_A k_x E_x}{e} \quad (9)$$

式中, S_A 为光阴极在 A 光源下的辐射积分灵敏度($\mu A/lm$); E_x 为景物反射光在光电阴极的照度值(lx); $k_x = \frac{\alpha(S, E_x) K_A}{\alpha(S, A) K_x}$ 为光阴极对景物反射光的积分灵敏度相较 A 光源的比例系数; $\alpha(S, E_x)$ 和 $\alpha(S, E_A)$ 分别为光阴极与景物和 A 光源的光谱匹配系数; K_x 为景物反射光的光视效能; e 为电子的电荷量。

于是,目标与背景辐射在光阴极面产生的平均光电子数 \bar{n} 和光电子对比度 C 分别为

$$\begin{cases} \bar{n} = \frac{(n_t + n_b)}{2} = \frac{S_A \bar{k} E_C}{e} \\ C = \frac{(n_t - n_b)}{(n_t + n_b)} = \frac{k_t E_t - k_b E_b}{k_t E_t + k_b E_b} = \frac{k_t - k_b + (k_t + k_b) C_E}{k_t + k_b + (k_t - k_b) C_E} = k_c C_E \end{cases} \quad (10)$$

式中, \bar{k} 为积分灵敏度比例系数的平均值; E_C 为景物在光阴极的平均照度; k_c 为将照度对比度转换为光电子数对比度的转换系数,随照度对比度以及夜天辐射条件而变化; C_E 为在光阴极目标背景照度对比度

$$C_E = \frac{E_t - E_b}{E_t + E_b} = C_0 C_d \quad (11)$$

式中, C_0 为目标与背景的初始对比度; C_d 为大气对比度衰减系数。

对于图 5 至图 7 的景物, $\alpha(S_{Gen2}, E_A) = 0.897$; $\alpha(S_{Gen3}, E_A) = 0.852$; $K_A = 121.276$,计算四种夜天辐射条件下的对比度转换系数,得到式(10)所需参数如表 2 所示。

表 2 不同夜天辐射条件下的超二代和三代的相关参数

Table 2 Related parameters of Gen2 and Gen3 under different nighttime radiation conditions

Radiation	K_x	C_0	Gen2				Gen3				
			$\alpha(S, E_x)$	k	\bar{k}	k_c	$\alpha(S, E_x)$	k	\bar{k}	k_c	
Full moon	Cloth	60.268	0.582	0.673	1.510	1.460	1.048	0.657	1.552	1.516	1.033
	Grass	65.475		0.683	1.410			0.681	1.480		
Moon+	Cloth	55.823	0.581	0.649	1.572	1.522	1.046	0.635	1.619	1.583	1.032
	Stars	60.527		0.659	1.472			0.658	1.547		
Stars	Cloth	12.134	0.578	0.411	4.580	4.551	1.009	0.422	4.950	4.934	1.005
	Grass	12.823		0.429	4.523			0.443	4.918		
Stars with clouds	Cloth	12.134	0.578	0.411	4.580	4.551	1.009	0.422	4.950	4.934	1.005

1.3 考虑背景等效照度的直视型微光夜视系统视距模型

与工业视距模型的推导思想相似,按照光量子噪声起伏理论,假设目标细节面积 $a(m^2)$,目标单位面积单位时间内产生的光电子数为 n_t ,在系统积分时间 $t(s)$ 内产生的平均光电子数为 $n_t ta$,该光电子数的统计涨落为 $\sqrt{n_t ta}$.同理,相邻背景在系统积累时间 $t(s)$ 内产生的平均光电子数为 $n_b ta$,统计涨落为 $\sqrt{n_b ta}$,假设像增强器的背景等效照度为 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

$$\begin{cases} S = n_t ta - n_b ta \\ N = \sqrt{n_t ta + n_b ta + 2E_{BI} \eta ta} \end{cases} \quad (12)$$

考虑到平均光电子数 \bar{n} 和对比度 C ,于是前聚焦成像系统光电转换的光电子图像信噪比 Φ_{in} 为

$$\Phi_{in}^2 = (S/N)^2 = 2\bar{n}^2 C^2 ta / [(\bar{n} + E_{BI} \eta) \beta^2] \quad (13)$$

式中, β 为像增强器前端电子光学横向放大率,对于近贴像增强器 $\beta = 1$.

由于微通道板 MCP 的噪声因子 F_ϕ 定义为

$$F_\phi = \Phi_{in}^2 / \Phi_{out}^2 \quad (14)$$

式中, Φ_{in} 和 Φ_{out} 分别为 MCP 的输入信噪比和输出信噪比.

结合式(10)光阴极面的平均光电子数和对比度公式, MCP 的光电子图像输出信噪比 Φ_{out} 为

$$\Phi_{out}^2 = \frac{2\bar{n}^2 k_c^2 C_E^2 ta}{F_\phi [\bar{n} + E_{BI} \eta]} = \frac{2S_A^2 E_c^2 \frac{\bar{k}^2}{e^2} k_c^2 C_E^2 ta}{F_\phi [S_A E_c \frac{\bar{k}}{e} + E_{BI} \eta]} = \frac{2S_A \bar{k} E_c k_c^2 C_E^2 ta}{e F_\phi [1 + E_{BI} / E_c]} \quad (15)$$

考虑到系统各光学环节的对比度衰减特性 $CTF(f)$, 对应到显示器输出端的输出信噪比 Φ'_{out} 为

$$\Phi'_{out} = \frac{2S_A \bar{k} E_c k_c^2 C_0^2 C_d^2 CTF^2(f) ta}{e F_\phi [1 + E_{BI} / E_c]} \quad (16)$$

对于三条带或四条带的测试图案,条带的长宽比分别为 $5:1$ 和 $7:1$,假设为 $\delta:1$,则对于空间频率 f (lp/mm)的条形图案,其目标细节面积为 $a = \delta \cdot 10^{-6} / 4f^2$,且 $CTF(f) = (8/\pi^2) MTF(f)$,则式(16)可改为

$$f = \frac{4\sqrt{2} \times 10^{-3} k_c C_0 C_d MTF(f)}{\pi^2 \sqrt{e} \Phi'_{out}} \left(\frac{S_A \bar{k} E_c \delta}{F_\phi [1 + E_{BI} / E_c]} \right)^{1/2} \quad (17)$$

考虑到微光夜视系统光电阴极面输入窗的照度 E_c 为

$$E_c = \frac{1}{4} \rho E_0 \tau_0 \tau_d \left(\frac{D}{f_0'} \right)^2 \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{f_0'} \right)^2 \right]^{-1} \quad (18)$$

式中, E_0 为环境照度; f_0' 为物镜焦距; D 为物镜直径; τ_0 为物镜透过率.

根据阈值信噪比理论,目标能够被感知的条件是 $\Phi'_{out} \geq \Phi'_{min}$,得到改进的视距模型

$$\begin{cases} f_k = 0.716 \times 10^3 \frac{k_c C_0 C_d MTF_s(f) \cdot MTF_{eye}(f/F)}{\Phi'_{min}} \left(\frac{D}{f_0'} \right) \left[\frac{S_A \bar{k} \rho E_0 \tau_0 \tau_d \delta}{F_\phi [1 + E_{BI} / E_c] [1 + 0.25 (D/f_0')^2]} \right]^{1/2} \\ R_L = \frac{f_0' f_k H_t}{N_e} \end{cases} \quad (19)$$

式中, H_t 为目标尺寸; N_e 为对应不同分辨水平的等效条带数。

式(19)是关于空间频率 f 的隐函数,采用不同的处理方法可得到不同的视距模型。

1) 工业视距模型

假设物镜相对孔径 D/f'_0 足够小,像增强器背景等效照度 E_{BI} 远小于阴极面照度 E_C ;微光夜视系统的输出只到荧光屏输出端,不考虑人眼的传递函数,取输出阈值信噪比 $\Phi_{\min}=2$ 及引入亮度增益对人眼分辨角的影响因子 $\beta(G)$;且不考虑光阴极面照度对比度到光电子对比度的转换系数 k_c ,即 $C=C_E$,则式(19)可转化为工业视距模型^[13]

$$\begin{cases} f_k = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d \text{MTF}_s(f_k) D}{\Phi_{\min} f'_0 \beta(G)} \left[\frac{S_A \alpha_\lambda t \epsilon \rho E_0 \tau_0 \tau_d}{F_\Phi} \right]^{1/2} \\ R_L = \frac{f'_0 f_k H_t}{N_e} \end{cases} \quad (20)$$

即,工业视距模型是本文模型的简化版。

2) 改进视距模型

本文改进视距模型除认为在超低照度下, E_C 可能与 E_{BI} 数值相当;且微光夜视物镜通常具有接近 1 的较大相对孔径,因此,工业视距模型的 2 个近似条件可能不成立外,还进一步认为:1)微光夜视系统与人眼视觉系统构成完整的视觉信息链,即传递函数为 $\text{MTF}(f) = \text{MTF}_H(f)$,那么亮度增益对系统成像性能的影响体现在人眼传递函数的变化上,因此去掉工业视距模型中的分辨角因子 $\beta(G)$;2)系统输出端应为视网膜,一般认为^[28]:58~145 个蓝绿光的光子进入人眼只有 5~14 个光子实际到达并作用于视网膜产生 1 个刺激,故取阈值信噪比 $\Phi_{\min}=0.2$;3)考虑了照度不同时环境照明的光谱变化,以及由此引起的光谱匹配系数的变化。故得到改进视距模型可望实现更接近实际的直视型微光夜视系统视距估算。

2 头盔夜视系统视距计算及其分析

为了验证模型的有效性,结合某三代头盔式双目微光观察仪在野外自然条件下的观察实验进行分析。观察背景为绿色草地,观察对象为身穿迷彩服的目标人,系统参数如表 3 和表 4 所示。

表 3 计算所需参数

Table 3 Parameters required for model calculation

Parameter	S_A	τ_0	G	$\bar{\rho}$	f'_0	τ_d	E_{BI}	F_Φ
Value	1600 $\mu\text{A}/\text{lm}$	0.85	20 000	0.37	20.7 mm	0.91	0.25 μlx	6.97
Parameter	f'_e	H_t	N_e	t	D	C_d	δ	
Value	20.7 mm	0.94 m	4	0.2 s	16 mm	0.89	28	

表 4 头盔夜视系统传递函数

Table 4 Transfer function of helmet night vision system

$f/(\text{lp} \cdot \text{mm}^{-1})$	5	10	15	20	25	33	35
MTF	0.71	0.49	0.294	0.19	0.11	0.035	0.025

采用函数 $\text{MTF}(f) = \exp[-(f/12.78)^{1.214}]$ 对表 4 的离散传递函数值进行拟合(如图 8 所示)。由于荧光屏输出亮度具有最大输出值^[28],控制荧光屏的最大输出亮度为 8 cd/m^2 ,进而利用人眼传递函数计算公式得到对于头盔夜视系统人眼传递函数以及系统整体传递函数如图 9 所示。

分别采用工业视距模型(Original model)、在本文模型中分别只增加等效背景照度的视距模型(E_{BI} correction)、只增加对比度转换(k_c correction)、只增加人眼信息传输模型(MTF_{eye} correction)以及本文完整的改进视距模型(Modified model)进行视觉估算,并与相应夜视头盔系统的外场实测数据进行比较,表 5 给出对目标人的识别距离估算结果。

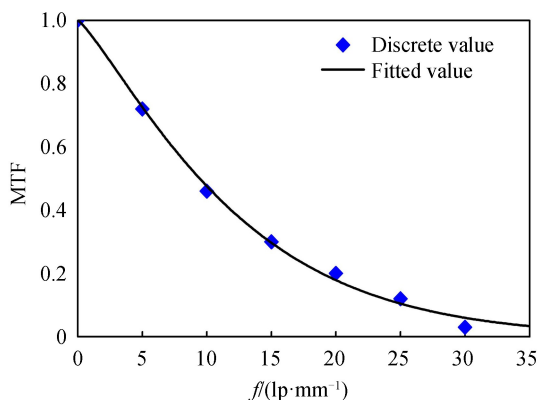


图 8 头盔系统 MTF 拟合曲线

Fig.8 MTF fitting curve of telescope system

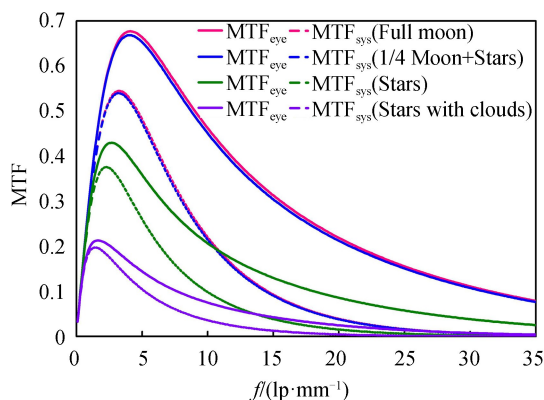


图 9 人眼传递函数与系统整体传递函数曲线

Fig.9 MTF of Human eye and the whole system

表 5 三代头盔对目标人的识别距离

Table 5 The recognition distance of the Gen3 helmet to the target person

	Full moon	1/4Moon+Stars	Stars	Stars with clouds
	2×10^{-1} lx	1×10^{-2} lx	1×10^{-3} lx	2×10^{-4} lx
G	1 076	20 000	20 000	20 000
C_0	0.582	0.581	0.578	0.578
Experimental data	/	/	100.0 m	60.0 m
Original model	211.2 m	128.3 m	95.2 m	43.6 m
E_{BI} correction	211.2 m	128.3 m	95.1 m	42.8 m
k_c correction	218.2 m	129.3 m	95.3 m	43.7 m
MTF _{eye} correction	209.1 m	140.6 m	104.4 m	60.6 m
Modified model	216.0 m	141.5 m	104.3 m	59.7 m

1) 在较高照度的夜间满月条件下, 几种模型的识别距离估算结果相差不超过 9 m(相对本文模型的相对误差约 4%), 但随环境照度的降低而减小的幅度不同, 工业模型的下降速度更快一些, 在阴天星光条件下, 识别距离相差扩大到 16.1 m(相对误差达到约 27%);

2) E_{BI} 的影响仍较小, 到 10^{-3} lx 和 2×10^{-4} lx 的识别距离偏差只有 0.3~1.0 m; 考虑人眼信息传输的影响则较为明显, 在上述照度下的偏差扩大到 9.1~16.1 m, 与本文完整模型的结果只有稍许差异;

3) 对比度转换 k_c 修正在低照度下与工业模型相近, 但在照度较高时, 偏差增大, 这是因为工业模型采用了与星光相近 A 光源进行计算, 而在较高照度下月光的影响更强一些;

4) 与实际观察结果相比较, 工业视距模型和本文模型识别视距的预测相对误差虽然在 10^{-3} lx 时分别为 4.8% 和 4.3%, 基本相当, 但在 2×10^{-4} lx 时分别为 27.3% 和 0.5%, 差别较为明显, 表明本文模型在 10^{-3} lx 以下的超低照度下具有更高的估算精度, 在较宽的照度范围内都较工业模型具有更佳准确性和适应性;

5) 只加入人眼视觉特性修正的结果最接近本文模型, 这表明考虑人眼视觉的必要性. 实际上, 在工业视距模型中, 将亮度增益对人眼阈值的影响转换为人眼在不同照度水平下分辨角的变化 $\beta(G)$, 在满月 2×10^{-1} lx 高照度水平下, 加入人眼视觉特性与工业视距模型 $\beta(G)$ 的影响相近, 计算结果相差不大; 但在 10^{-4} lx 和 10^{-3} lx 水平下, 工业视距模型的结果与实测结果明显偏差, 说明将人眼分辨角参量与阈值信噪比相乘的修正并不适当; 而修正模型将系统与人眼作为一个整体考虑, 人眼传递函数随亮度增益而变化, 系统视网膜输出端的阈值信噪比为一定值, 按照这一思想的模型结果更接近实测结果.

进一步对与三代夜视头盔具有相同光学系统参数的超二代夜视头盔的识别距离进行了估算, 选取超二代典型参数: $S_A = 700 \mu A/lm$; $G = 10\ 000/15\ 000$, 仿真计算的结果如表 6 所示.

除有与三代头盔类似的特性外, 还可以看出:

1) 在不同照度水平下超二代的识别距离都明显逊色于三代, 从较高照度的满月晴朗到超低照度的有云星光条件下, 超二代和三代的识别距离约差 50/12/12.3/10 m(相对三代识别距离相对减小量约 23%/8.7%/11.8%/16.8%), 表明三代微光夜视的作用距离整体上优于超二代, 特别是在超低照度下, 识别

距离相差大于 10%;

2)像增强器的增益直接关系超低照度下的系统作用距离,由于在相同的加速电压下,荧光屏的亮度与电流密度成正比,因此,积分灵敏度更高的三代像增强器在识别距离方面具有一定的优势。

表 6 超二代头盔对目标人的识别距离

Table 6 The recognition distance of the Gen2 helmet to the target person

	Full moon	1/4Moon+Stars	Stars	Stars with clouds
	2×10^{-1} lx	1×10^{-2} lx	1×10^{-3} lx	2×10^{-4} lx
G	1 076	10 000/15 000	10 000/15 000	10 000/15 000
C_0	0.582	0.581	0.578	0.578
Original model	163.1 m	111.1 m/113.1 m	75.6 m/78.9 m	28.5 m/31.2 m
E_{BI} correction	163.1 m	111.1 m/113.1 m	75.5 m/78.7 m	27.9 m/30.6 m
k_c correction	164.7 m	112.5 m/114.5 m	75.8 m/79.1 m	28.7 m/31.4 m
MTF _{eye} correction	165.1 m	123.9 m/128.1 m	87.9 m/91.8 m	47.0 m/50.1 m
Modified model	166.1 m	125.0 m/129.2 m	88.1 m/92.0 m	46.7 m/49.7 m

3 结论

三代微光夜视是目前国内外重要的夜视技术途径,科学地建立系统性能模型对于微光夜视系统的设计具有重要的指导作用.论文针对传统工业视距模型提出了 3 个方面的修正:1)建立光阴极平均光电子数和光电子对比度代替以往景物平均照度和对比度,将夜天光光谱和景物光谱反射特性等因素统一考虑,使得模型推导过程更为严谨;2)将人眼传递函数加入到整个成像系统信息链中,更完整地描述成像过程中信息的传输;3)在系统噪声模型中加入了暗背景噪声项等,有利于在 10^{-4} lx 超低照度水平下对系统作用距离的预测.针对三代和超二代夜视头盔对人的识别任务,通过模拟仿真以及与实测结果的对比分析,表明本文模型相较工业视距模型的计算结果更合理,且接近测试结果,此外也能够有效反映超二代微光夜视系统相对三代微光夜视系统在目标识别性能方面的差异.本文模型有利于提高微光夜视系统总体设计的准确性,我们将进一步在模型和应用环境完善后推广应用。

参考文献

- [1] JIN Wei-qi, GAO Zhi-yun, SU Xue-gang, *et al.* Matching problem between photoelectric imaging system and human vision[J]. *Infrared Technology*, 2000, **22**(5): 40-44.
金伟其, 高雅允, 苏学刚, 等. 光电成像系统与入眼视觉的匹配问题[J]. 红外技术, 2000, **22**(5): 40-44.
- [2] ROSEA. 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] DEVRIES H L. The quantum character of light and its bearing upon the threshold of vision[J]. *Physica*, 1954, **7**(7): 553-556.
- [4] COLTMAN J W, ANDERSON A E. Noise limitations to resolving power in electronic imaging[J]. *Proceedings of the IRE*, 1960, **48**(5): 858-865.
- [5] RICHARDS E A. Limitations in optical imaging devices at low light levels[J]. *Applied Optics*, 1969, **8**(10): 1999-2005.
- [6] SCHAGEN P. Electronic aids to night vision[J]. *Electronics & Power*, 1975, **21**(7): 437-439.
- [7] SCHNITZLER D. Visual systems for night vision[M]. Photoelectronic Imaging Devices. Springer US, 1971.
- [8] ROSELLF A, WILLSON R H. Basics of detection, recognition and identification in electro-optical formed imagery[C]. Solving Problems in Security, Surveillance and Law Enforcement with Optical Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1973.
- [9] RIEHARD J C, LAMPORT D L, ROAUX E, *et al.* Performance of passive night vision systems using image intensifier tubes. influence of the photocathode spectral response [J]. *Acta Electron*, 1977, **20**(4): 353-368.
- [10] ZHOU Yi-song. Image detection characteristics of imaging devices[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1982, (1): 17-28.
邹异松. 成像器件的图象探测特性[J]. 北京工业学院学报, 1982, (1): 17-28.
- [11] AI Ke-cong, ZHOU Li-wei, ZENG Gui-lin, *et al.* Research on new threshold detection theory and aparent distance equation of the low-light night vision system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, **23**(5): 1-6.
艾克聪, 周立伟, 曾桂林等. 微光夜视系统新的阈值探测理论和视距探测方程研究[J]. 应用光学, 2002, **23**(5): 1-6.

- [12] LIU Song-tao, WANG Bo-lin, WANG Long-tao. Estimation and simulation of operation range for low-light-level night vision device[J]. *Laser & Infrared*, 2016, **46**(4): 462-465.
刘松涛, 王博林, 王龙涛. 微光夜视仪的作用距离估算与仿真[J]. 激光与红外, 2016, **46**(4): 462-465.
- [13] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Correction of the theoretical formula of low-light imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(60): 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**(60): 761-765.
- [14] LIU Lei, LI Yuan, QIAN Yun-sheng, 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.
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.
- [15] LIU Qian-kun, LIU Lei, DENG Yu-bin, et al. Apparent distance theory revision for low-light-level night vision system based on noise factor[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, **49**(7): 249-264.
- [16] LIU Lei, CHANG Ben-kang. Spectral matching between input reflective radiation of objects and Super S25 & New S25 photo cathodes[J]. *Vacuum Science and Technology*, 2004, **24**(4): 276-278.
刘磊, 常本康. 超 S25 和新 S25 光电阴极与景物反射光谱的光谱匹配系数[J]. 真空科学与技术学报, 2004, **24**(4): 276-278.
- [17] LI Wei, CHANG Ben-kang. Spectral matching coefficient of GaAs photocathode and scene reflection spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(9): 857-859.
李蔚, 常本康. GaAs 光电阴极与景物反射光谱的光谱匹配系数[J]. 光子学报, 1999, **28**(9): 857-859.
- [18] LLOYD J M. Thermal imaging system[M]. YIN Bai-yun, DAT Chuan-heng transl. Beijing: National Defence Industry Press, 1981.
LLOYD J M. 热成像系统[M]. 尹白云, 戴传衡, 译. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [19] DRIGGERS R G, JACOBS E L, VOLLMERHAUSEN R H, et al. Current infrared target acquisition approach for military sensor design and wargaming[C]. Proc. of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVII, 2006, 6207: 620709.
- [20] JIN Wei-qi, GAO Zhi-yun. Research on optimal angular magnification of thermal imaging system[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, **17**(5): 558-563.
金伟其, 高稚允. 热成像系统最佳角放大率的研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, **17**(5): 558-563.
- [21] WANG Ji-hui, JIN Wei-qi, WANG Xia, et al. Performance evaluation of thermal imaging systems based on MRTD channel width[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4): 256-260.
王吉晖, 金伟其, 王霞, 等. 基于 MRTD 信道宽度的热成像系统性能评价理论研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, **26**(4): 256-260.
- [22] BARTEN P G J. Physical model for the contrast sensitivity of the human eye[J]. SPIE, 1992, **3**(1666): 57-72.
- [23] BARTEN P G J. Evaluation of subjective image quality with the square-root integral method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, **7**(10): 2024-2031.
- [24] ZHOU Yan, JIN Wei-qi, LIU Guang-rong, et al. Evaluation of electro-optical imaging system with channel width method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 212-216.
周燕, 金伟其, 刘广荣, 等. 光电成像系统的信道宽度评价方法[J]. 红外与激光工程, 2002, **31**(3): 212-216.
- [25] HALONEN L, PUOLAKKA M, AYAMA M, et al. CIE 191:2010 Recommended system for mesopic photometry based on visual performance[J]. *Color Research & Application*, 2011, **36**(1): 46-46.
- [26] 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.
- [27] TAO Yu, JIN Wei-qi, WANG Yao, et al. The MTF analysis of high performance proximity image intensifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **45**(6): 168-173.
陶禹, 金伟其, 王瑶, 等. 高性能近贴式像增强器的调制传递函数分析[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 168-173.
- [28] 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.