

## 一种改进的微光夜视系统视距探测方程

莫涌超 刘磊 钱芸生 胡朝龙 拜晓锋 石峰

### Improved apparent distance detection model of low-level-lightnight vision system

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

引用本文:

莫涌超, 刘磊, 钱芸生, 等. 一种改进的微光夜视系统视距探测方程[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 887–897. DOI: 10.5768/JAO202344.0406002

MO Yongchao, LIU Lei, QIAN Yunsheng, et al. Improved apparent distance detection model of low-level-lightnight vision system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 887–897. DOI: 10.5768/JAO202344.0406002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0406002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高分辨率光学遥感卫星小目标法在轨辐射定标

In-flight radiometric calibration of high spatial resolution satellite optical sensor using small targets

应用光学. 2019, 40(6): 951–957 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601004>

#### 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>

#### 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>

#### 一种单目视觉位姿测量系统的误差分析方法

Error analysis method for monocular vision pose measurement system

应用光学. 2019, 40(1): 79–85 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0103001>

#### 基于深度学习的无人车夜视图像语义分割

Semantic segmentation of night vision images for unmanned vehicles based on deep learning

应用光学. 2017, 38(3): 421–428 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0302007>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0887-11

# 一种改进的微光夜视系统视距探测方程

莫涌超<sup>1</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 钱芸生<sup>1</sup>, 胡朝龙<sup>1</sup>, 拜晓锋<sup>2</sup>, 石峰<sup>2</sup>

(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:** 视距是评估微光夜视成像系统性能的一个重要参数。随着微光夜视探测技术的发展, 经典视距模型的视距仿真结果与实测结果出现了一些偏差, 特别是在  $10^{-3}$  lx 低照度条件下视距仿真结果不甚理想, 这对微光夜视仪在实际应用中造成了很大的阻碍。针对这一问题, 从微光成像系统成像链路的三个环节对经典视距模型进行修正: 考虑大气透过率对微光夜视系统视距的影响并对经典视距模型中的大气透过率因子进行修正; 基于像增强器噪声因子对视距模型进行修正; 考虑人眼视觉传递特性对微光夜视系统视距的影响, 在系统的传递函数模型中加入了简化的人眼视觉模型。进而推导出改进的视距模型。结合野外试验数据, 验证了改进视距模型的有效性和实用性, 这对于微光夜视系统的设计、评估和应用具有一定的指导性意义。

**关键词:** 微光夜视系统; 视距模型; 大气透过率; 噪声因子; 人眼视觉模型

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202344.0406002](https://doi.org/10.5768/JAO202344.0406002)

## Improved apparent distance detection model of low-level-light night vision system

MO Yongchao<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, QIAN Yunsheng<sup>1</sup>, HU Chaolong<sup>1</sup>, BAI Xiaofeng<sup>2</sup>, SHI Feng<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Apparent distance is an important parameter to evaluate the performance of low-level-light (LLL) night vision imaging system. With the development of LLL night vision detection technology, the simulation results of the classical apparent distance model show some deviations from the actual measurement data, especially the simulation results are not ideal under the low illumination of  $10^{-3}$  lx, which causes great obstacles to the practical application of the LLL night vision system. Aiming at this problem, the classical apparent distance model was modified from three aspects: the first is considering the influence of atmospheric transmittance on the apparent distance of LLL night vision system and modifying the atmospheric transmittance factors in the classical apparent distance model, the second is optimizing the apparent distance model based on noise factors of image intensifier, the third is considering the influence of human visual transmission characteristics on the apparent distance of LLL night vision system, and the simplified human visual system was added into the transfer function model of the system. The improved apparent distance model was derived, and its effectiveness as well as practicability were verified by the field test data, which had certain guiding significance for the design, evaluation and application of LLL night vision system.

**Key words:** low-level-light night vision system; apparent distance model; atmospheric transmittance; noise factors; human visual model

收稿日期: 2022-11-03; 修回日期: 2023-01-07

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: 莫涌超 (1998—), 男, 硕士, 主要从事微光夜视系统的性能评估。Email: [myc1220276266@163.com](mailto:myc1220276266@163.com)

通信作者: 刘磊 (1978—), 女, 教授, 博士, 主要从事半导体光电发射材料设计与制备。Email: [liu1133\\_cn@sina.com.cn](mailto:liu1133_cn@sina.com.cn)

## 引言

微光夜视仪通过器件中光电阴极的光电转换、微通道板的电子倍增等一系列处理,可以将夜天光下的微弱光图像变为人眼可见光图像。随着微光夜视探测技术的发展,微光夜视仪在军事领域、民用领域等领域得到了广泛应用。

在习惯上,讨论某种夜视仪的性能时往往说它的视距是多少,所以视距这个参量是衡量微光夜视系统性能好坏的一个重要标准。针对如何有效地使用视距探测方程对夜视系统的视距进行计算这个基础性问题,国内外研究学者对阈值探测理论、视距理论模型等方面做了很多研究。1942年,ROSE A以量子波动理论和阈值信噪比理论为基础,首先提出了理想成像系统的视距探测理论<sup>[1]</sup>,成为了微光成像系统视距理论的理论基础;之后,DEVERIES H L、COLTMAN J W、SCHAGEN P等都对其做了进一步的完善,并给出了相应的理想视距方程<sup>[2-4]</sup>,但由于其过于理想化的模型条件,因此它们都有着很大的局限性;在1971至1982年间,ROSELL F A、SCHNITZLER A D、RICHARD E A和BLACKLER F G<sup>[5-8]</sup>等进一步考虑了目标长宽比、系统传递函数、对比度和噪声因子等影响因素,这些改善是对理想视距探测方程的很大改进,然而这些改进视距模型在进行实验时仍然存在很大偏差。1982年,邹异松在理想视距探测方程的基础上,进一步考虑了实际成像器件噪声特性、调制传递函数与图像探测特性的关系<sup>[9]</sup>,提出了响应的实际视距探测方程;2002年,艾克聪等在人眼视觉理论和微光成像系统视距探测理论的基础上,分析了量子起伏理论和线性滤波理论的规律和两者之间的关系,提出了新的视距探测理论<sup>[10]</sup>;2003年,刘磊和常本康在微光成像系统视距探测方程的基础上,综合考虑了大气对对比度的衰减作用、像增强器噪声功率因子和光谱匹配等诸多因素的影响,建立了趋近实际的视距探测方程<sup>[11]</sup>;2014年,张竹平、李力等基于大气衰减系数、MCP噪声因子、系统调制传递函数等多个方面对经典视距模型进行修正和优化,使得微光夜视系统的分辨率计算和视距估算更为准确和实用<sup>[12]</sup>;2016年,刘松涛等考虑了大气特性、暗背景噪声等因素对微光夜视系统探测距离的影响,并对受光子噪声受限的分辨角进行修正,通过实验证明了修正的视距模型的优越性<sup>[13]</sup>;2020年,金伟其等针对视距模型在低照度下不理想的问题,进一步考虑了人眼传

递特性、背景噪声等影响因素,进而推导出改进的视距模型<sup>[14]</sup>。

上述国内外研究人员对微光夜视系统的视距模型都做了大量的研究工作。他们从理想微光夜视系统的基本探测理论出发,综合考虑各种因素的影响并对视距模型做出了相应的修改和完善,使得微光夜视系统视距模型更加接近实际情况,但由于出发点不同,从而发展出了不同形式的视距模型。这就造成了在实际应用中,相关的研制单位和个人在评估微光夜视系统性能时,会由于采用的视距计算模型不一致而导致视距计算结果不一致,差异性较大,这对实际评价会产生不利影响。因此,一个有效且实用的视距模型对于统一微光夜视系统的性能评价工具有着积极的推动作用。特别地,上述2003年常本康和刘磊等建立的视距计算模型,对微光夜视系统取得了较一致的预测结果,该视距模型在国内行业中被普遍使用(下文简称工业视距模型)。但是,随着国内微光夜视技术的快速发展,工业视距计算模型的视距估算结果与实测结果产生了一些偏差,特别是在 $10^{-3}$  lx低照度条件下视距仿真结果不甚理想,这对微光夜视仪在实际应用中造成了很大的阻碍。因此,建立一个更加完善且适用于低照度条件下的视距模型对于微光夜视技术的发展有着重要的意义。针对上述问题,本文在工业视距模型的理论基础上进行分析讨论,并做出相应的修正和改进,以期建立一个更实用完善且适用于低照度条件下的微光夜视系统视距计算模型。分析工业视距模型仿真结果产生偏差的原因,大概有以下几个方面:1)工业视距模型在计算过程中固化了大气透过率这一影响因子的值,而大气透过率会随着大气条件的变化而变化,因此需要分析大气透过率对微光夜视系统视距的影响;2)像增强器是微光夜视系统的一个重要组成部分,其值的高低能够直接影响微光夜视仪在夜天空条件下的视距和图像清晰度,工业视距模型虽然考虑了噪声因子的影响,但是固化了噪声因子的值,因此有必要从噪声因子入手对视距模型进行修正;3)在工业视距模型中,仅将人眼-脑作为一个简单的信号接收器,而视觉成像过程需要经过眼球光学系统成像、视网膜处理和大脑视觉中枢处理才产生真正的视觉,因此需要分析人眼视觉传递特性对微光夜视仪视距的影响,基于人眼视觉模型对工业视距模型进行修正。结合上述几个原因,本文将从大气

透过率、像增强器噪声因子、人眼视觉传递特性三个方面出发,对工业视距模型进行修正和改进,建立了一个更加实用且适用于低照度条件下的视距模型,并通过野外实测数据对改进视距模型的有效性进行验证。这对于微光夜视系统的设计、评估和应用具有指导意义,可以推动微光夜视系统的改进、优化和提高。

## 1 经典视距探测方程的修正

### 1.1 大气透过率的影响

夜天空辐射由目标物体反射,经大气传输到达像增强器光电阴极输入窗,在这个传输过程中会有部分辐射能量损失,损失程度可以用大气透过率表示。高的大气透过率能够显著地提高目标对比度,从而影响到微光夜视仪的视距。

微光夜视条件下,大气透过率 $\tau_0$ 可按下式计算<sup>[15]</sup>:

$$\tau_0 = \exp\left(-\frac{3.912}{V}R_L\right) \quad (1)$$

式中: $V$ 为能见距离,也叫能见度; $R_L$ 为观察距离,在微光夜视条件下, $R_L$ 即为微光夜视仪的视距, $R_L$ 可以表示为

$$R_L = \frac{f'_0 A_k H_t}{N_e} \quad (2)$$

式中: $f'_0$ 为夜视仪的物镜焦距; $A_k$ 为微光夜视系统的空间频率,即系统分辨率,它是指成像系统能够将两个相隔极近的目标的像刚好分辨清的能力,它反映了系统的成像和传像能力; $H_t$ 为目标尺寸; $N_e$ 为观察水平,即发现、识别或看清三个观察距离等级对应的等效条带数目,其值取决于目标类型以及观察距离等级<sup>[11]</sup>。

结合式(1)和式(2),大气透过率可以表示为

$$\tau_0(A_k) = \exp\left(-\frac{3.912 f'_0 A_k H_t}{V N_e}\right) \quad (3)$$

可见,大气透过率的计算公式是一个关于系统分辨率 $A_k$ 的表达式。

### 1.2 像增强器噪声因子的修正

像增强器是微光夜视系统中的核心器件,像增强器的噪声特性决定着最终的成像质量,直接影响微光夜视仪在夜天空环境中的视距。像增强器噪声因子 $N_{FT}$ 可以客观地评价像增强器的噪声特性,考虑到噪声因子会影响微光夜视系统的视距,本节将从噪声因子入手,基于像增强器噪声因子理论模型,创建MCP扩口前后的像增强器噪声因

子数学模型。

#### 1) 原始MCP像增强器噪声因子理论模型

噪声因子被定义为系统输入信噪比与输出信噪比之比,而微光像增强器噪声因子 $N_{FT}$ 的数学模型可表示为<sup>[16]</sup>

$$N_{FT} = \left( \left( \frac{1 + I_d/I_s}{QA_m} \right) \left( 1 + \frac{2}{\delta_e} - \frac{1}{\delta_e g_m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: $I_s$ 为阴极光电流; $I_d$ 为暗电流; $A_m$ 为MCP输入面的开口面积比; $Q$ 为量子效率; $\delta_e$ 为微通道壁的二次电子发射系数; $g_m$ 为微通道板的电流增益。从式(4)中可以发现,描述像增强器噪声特性的噪声因子与开口面积比直接相关,提升开口面积比会带来噪声因子的减小,越小的噪声因子表明系统输出信噪比越大,成像质量更好,微光夜视仪的视距更远。提升MCP开口信噪比的一个重要途径是MCP扩口技术,MCP扩口后开口面积比会发生变化,相应地噪声因子也会发生变化。因此下面将分析MCP经扩口工艺后开口面积比的计算方法,并给出相应的像增强器噪声因子数学模型。

#### 2) 扩口MCP像增强器噪声因子理论模型

MCP扩口技术就是将MCP输入面的通道口通过腐蚀工艺和扩口处理,使其成漏斗状,从而提高MCP的开口面积比。MCP扩口后开口面积比的计算方法将发生变化,假设从光电阴极出射的电子垂直进入MCP输入面, $r$ 表示原始微通道板孔径, $h$ 表示通道内扩口深度。如图1所示,在 $h$ 不变的情况下,当扩口后的微通道板孔径 $R'$ 不超过某一阈值时,那么撞击到漏斗壁上的光电子能够全部反弹到微通道内,而这一阈值与通道内扩口深度有关。

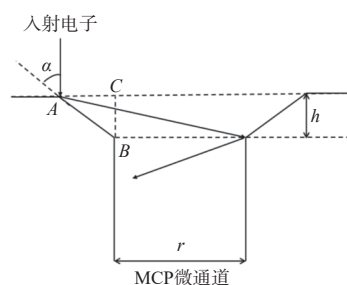


图1 微通道有效扩口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-channel effective flaring

当扩口后的微通道板孔径 $R'$ 超过阈值时,那么撞击到漏斗壁的部分电子将无法被反弹进入微通道内,如图2所示。

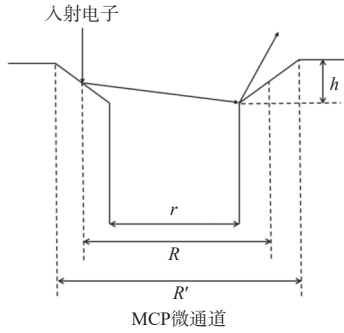


图2 微通道无效扩口示意图

Fig. 2 Schematic diagram of micro-channel ineffective flaring

结合图1和图2,假设从光电阴极出射的电子与MCP漏斗壁的夹角 $\angle ABC = \alpha$ ,扩口后微通道板孔径为 $R'$ ,那么满足入射电子能够全部进入MCP通道内的有效扩口深度 $h$ 可以表示为

$$h = r \tan(90 - 2\alpha)(1 + \cos 2\alpha) \quad (5)$$

在 $\triangle ABC$ 中, $AC = h \tan \alpha$ ,那么MCP扩口后的有效孔径 $R$ 可表示如下:

$$R = 2r \tan(90 - 2\alpha)(1 + \cos 2\alpha) \tan \alpha + r \quad (6)$$

当扩口深度 $h$ 固定时,且扩口后的微通道孔径 $R'$ 的值介于区间 $[r, R]$ 之间,那么扩口MCP开口面积比为

$$A_m = \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \left( \frac{R'}{l} \right)^2 \quad (7)$$

当 $R'$ 的值大于有效孔径 $R$ 时,则扩口MCP开口面积为

$$A_m = \frac{\sqrt{3}\pi}{6} \left( \frac{r}{l} \right)^2 \quad (8)$$

式中 $l$ 为微通道板孔间距。

综上所述,像增强器噪声因子的计算分为两部分:

1)若扩口后的微通道孔径 $R'$ 的值小于有效孔径 $R$ 时,像增强器噪声因子可以表示为

$$N_{FT} = 1.05 \cdot \frac{l}{R'} \left( \left( \frac{1 + I_d/I_s}{Q} \right) \left( 1 + \frac{2}{\delta_e} - \frac{1}{\delta_e g_m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

2)若扩口后的微通道孔径 $R'$ 的值大于有效孔径 $R$ 时,像增强器噪声因子可以表示为

$$N_{FT} = 1.05 \cdot \frac{l}{r} \left( \left( \frac{1 + I_d/I_s}{Q} \right) \left( 1 + \frac{2}{\delta_e} - \frac{1}{\delta_e g_m} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

### 1.3 人眼视觉模型的修正

微光夜视系统是环境、仪器和人眼三者的综合作用,在工业视距模型中,仅将人眼-脑作为一个简单的信号接收器,而视觉成像过程需要经过眼

球光学系统成像、视网膜处理和大脑视觉中枢处理才能产生真正的视觉,因此需要分析人眼视觉传递特性对微光夜视仪视距的影响。目前描述人眼视觉传递特性的人眼视觉模型主要分为低通型和带通型两类,在目前经典的几种人眼视觉模型中,具有带通特性的人眼复合模型可以较为全面地描述人眼视觉传递特性。人眼复合模型综合考虑了显示屏亮度、视觉神经的抑制作用、人眼瞳孔直径等诸多因素的影响,能够很好地描述已公布的实验数据。但是人眼复合模型的缺点是参数复杂,实用性较差。为了提高人眼复合模型在实际应用中的实用性,本节将引入人眼复合模型中相关参数的典型值和变量的简化条件对人眼复合模型进行简化,并基于简化的人眼复合模型对工业视距模型进行修正。

#### 1) 人眼复合模型

人眼复合模型<sup>[17]</sup>表达式如下:

$$f_{eye}(A_{eye}) = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{T}{2}} \left\{ \left[ \frac{1}{\eta_e P E_e} + \frac{\Phi_0}{1 - \exp(-A_{eye}^2/A_0^2)} \right] \times \left[ \frac{1}{X_0^2} + \frac{1}{X_e^2} + \left( \frac{A_{eye}}{N_e} \right)^2 \right]^{-0.5} M_{opt}(A_{eye}) \right\} \quad (11)$$

式中: $A_{eye}$ 是人眼空间频率,即人眼分辨率; $K$ 是阈值常量; $T$ 是人眼视觉系统的积分时间; $\eta_e$ 是人眼量子效率; $\Phi_0$ 是高频区域噪声谱密度; $X_0$ 是目标视场角; $A_0$ 是特征空间频率; $X_e$ 、 $N_e$ 分别是人眼积累信息所需的最大视场角和最大角周期; $P$ 是与光度有关的常量; $E_e$ 为视网膜上的照度。 $E_e$ 的计算公式可以表示为

$$E_e = \frac{\pi}{4d_e^2 L} \quad (12)$$

式中 $d_e$ 为人眼瞳孔直径,表达式为

$$d_e = (-9.511 + 13.25e^{\frac{\ln L}{21.082}}) \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中 $L$ 为微光夜视仪荧光屏实际亮度。

式(11)中 $M_{opt}(A_{eye})$ 是人眼光学系统传递函数的高频部分, $M_{opt}(A_{eye})$ 计算方法如下:

$$M_{opt}(A_{eye}) = \exp(-\pi^2 \sigma^2 A_{eye}^2) \quad (14)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{sph} d_e^3)^2} \quad (15)$$

式中: $\sigma$ 为光学标准偏差; $\sigma_0$ 是一个常量; $C_{sph}$ 为人眼球差系数。

显然,人眼复合模型参数众多、计算复杂,应用起来非常不方便,因此有必要对人眼复合模型进行简化。下面通过使用人眼复合模型中参数的

典型值和引入影响结果的变量的简化条件对人眼复合模型进行简化,进而建立一个参数简单、计算方便的人眼复合模型,以下简称简化复合模型。

## 2) 简化复合模型

通过使用表1中变量  $K$ 、 $T$ 、 $X_e$ 、 $\Phi_0$ 、 $N_e$  的典型值<sup>[18]</sup>对人眼复合模型式(11)进行简化。

表1 复合模型中一些参数的典型值

Table 1 Typical values for some parameters in compound model

| $K$ | $T / \text{sec}$ | $X_e / \text{deg}$ | $\Phi_0 / (\text{sec} \cdot \text{deg}^2)$ | $N_e / \text{cyc}$ |
|-----|------------------|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| 3.4 | 0.1              | 12                 | $3 \times 10^{-8}$                         | 15                 |

于是,人眼复合模型可以表示为

$$f_{\text{eye}}(A_{\text{eye}}) = 0.0416 \cdot \left\{ \left[ \frac{1}{\eta_e P E_e} + \frac{3 \times 10^{-8}}{1 - \exp(-A_{\text{eye}}^2 / A_0^2)} \right] \times \left[ \frac{1}{X_0^2} + \frac{1}{144} + \left( \frac{A_{\text{eye}}}{15} \right)^2 \right]^{-0.5} \right\} M_{\text{opt}}(A_{\text{eye}}) \quad (16)$$

将式(12)代入式(16)中的视网膜照度  $E_e$ , 并且进一步使用表2中变量  $A_0$ 、 $P$ 、 $\eta_e$  的典型值<sup>[18]</sup>对人眼复合模型进行简化。

表2 复合模型中一些参数的典型值

Table 2 Typical values for some parameters in compound model

| $\eta_e$ | $A_0 / (\text{cyc} \cdot \text{deg}^{-1})$ | $P / (\text{photons} / (\text{td} \cdot \text{sec} \cdot \text{deg}^2))$ | $\sigma_0 / \text{deg}$ | $C_{\text{sph}} / (\text{deg} \cdot \text{mm}^{-3})$ |
|----------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------|
| 0.03     | 8                                          | $1.285 \times 10^6$                                                      | 0.0137                  | $1 \times 10^{-4}$                                   |

于是,人眼复合模型进一步化简为

$$f_{\text{eye}}(A_{\text{eye}}) = 4556 \cdot \left\{ \left( 1100 \cdot d_e^2 L + \frac{1}{1 - \exp(-0.016 A_{\text{eye}}^2)} \right) \left( 1 + \frac{144}{X_0^2} + 0.64 A_{\text{eye}}^2 \right) \right\}^{-0.5} M_{\text{opt}}(A_{\text{eye}}) \quad (17)$$

$M_{\text{opt}}(A_{\text{eye}})$  的计算公式由式(14)和式(15)给出,表明它不仅受到常量  $\sigma_0$  和视觉系统的球差  $C_{\text{sph}}$  的影响,还受人眼瞳孔直径  $d_e$  的影响。进一步使用表2中  $\sigma_0$  和  $C_{\text{sph}}$  的典型值,最终得到简化后的人眼复合模型

$$f_{\text{eye}}(A_{\text{eye}}) = \frac{4556 \cdot \exp[-0.0019(1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot d_e^6) A_{\text{eye}}^2]}{\left\{ \left( 1100 \cdot d_e^2 L + \frac{1}{1 - \exp(-0.016 A_{\text{eye}}^2)} \right) \left( 1 + \frac{144}{X_0^2} + 0.64 A_{\text{eye}}^2 \right) \right\}^{0.5}} \quad (18)$$

式中:  $A_{\text{eye}}$  为人眼分辨率;  $L$  为荧光屏实际亮度,其

值为光电阴极输入面上的照度与电流增益的乘积;  $X_0$  是目标视场角,由显示屏尺寸和观察距离决定;  $d_e$  为人眼瞳孔直径,  $d_e$  是一个与荧光屏实际亮度  $L$  有关的变量。相较于原始的人眼复合模型,简化后的复合模型仅依赖少量参数,参数简单,计算复杂度大大减少。下面通过两组实验来验证简化复合模型的有效性以及实用性。

图3和图4显示了简化复合模型的理论值和Campbell<sup>[19]</sup>和Watanabe<sup>[20]</sup>的实际测量数据。Campbell等研究人员测试了  $500 \text{ cd/m}^2$  下的人眼调制传递函数,目标视场角为  $10^\circ \times 10^\circ$ ; Watanabe等研究人员测试了  $34 \text{ cd/m}^2$  下的人眼调制传递函数,目标视场角为  $19^\circ \times 14^\circ$ 。两个实验表明,简化复合模型计算得到的理论值与实际测试值有较好的一致性,验证了简化复合模型的有效性和实用性。

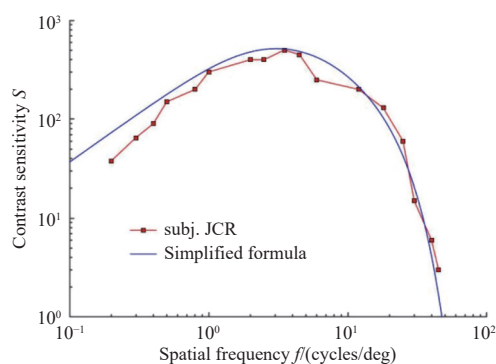


图3 简化复合模型的理论值和 Campbell 的测量数据

Fig. 3 Theoretical values of simplified compound model and measured data of Campbell

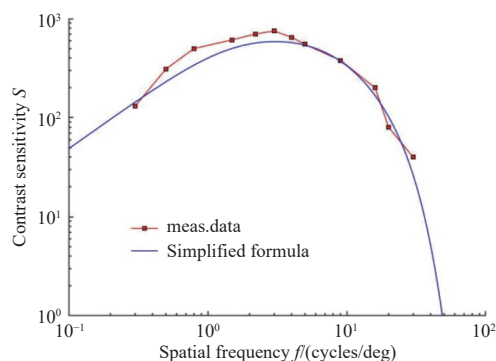


图4 简化复合模型的理论值和 Watanabe 的测量数据

Fig. 4 Theoretical values of simplified compound model and measured data of Watanabe

## 1.4 改进的微光夜视仪视距方程

本节将给出工业视距模型的理论模型,并结合考虑大气透过率、像增强器噪声因子、人眼视觉传递特性等因素对微光夜视系统视距的影响,在工

业视距模型的理论基础上进行修正, 建立一个改进的新视距模型。

#### 1) 工业视距模型

工业视距模型的表达式为<sup>[11]</sup>

$$R_L = \frac{f_o' A_k H_t}{N_e} \quad (19)$$

式中:  $R_L$  为微光夜视仪的视距;  $f_o'$  为夜视仪的物镜焦距;  $H_t$  为目标尺寸;  $N_e$  为观察水平。

$$A_k = 1.432 \times 10^3 \frac{C_0 C_d MTF_s(A_k) \left( \frac{S_A \alpha_\lambda t \varepsilon E_c}{N_{FT}} \right)^{1/2}}{\Phi_{\min} \beta(G)} \quad (20)$$

式中:  $C_0$  为目标和背景的初始对比度;  $C_d$  为大气中对比度的衰减系数;  $f_s(A_k)$  为系统调制传递函数;  $\Phi_{\min}$  为人眼阈值信噪比;  $S_A$  为阴极积分灵敏度;  $\alpha_\lambda$  是从对标准光源转换到对景物反射辐射的光谱转换系数;  $t$  为人眼所需的能量积累时间;  $\varepsilon$  为目标长宽比;  $E_c$  为夜视仪阴极输入面上的照度;  $N_{FT}$  为像增强器噪声因子;  $\beta(G)$  为人眼分辨角和照度 1 000 lx 条件下人眼分辨角的比值。

下面对式 (20) 中几个重要参数的计算方法进行详细说明:

#### a) 目标与背景初始对比度 $C_0$

目标和背景的初始对比度  $C_0$  可由下式计算:

$$C_0 = \frac{\left| \int P(\lambda) S(\lambda) \rho_{1\lambda} d\lambda - \int P(\lambda) S(\lambda) \rho_{2\lambda} d\lambda \right|}{\int P(\lambda) S(\lambda) \rho_{1\lambda} d\lambda + \int P(\lambda) S(\lambda) \rho_{2\lambda} d\lambda} \quad (21)$$

式中:  $P(\lambda)$  为自然辐射源的相对光谱辐射分布;  $S(\lambda)$  为阴极相对光谱响应位置分布;  $\rho_{1\lambda}$  为观察目标的光谱反射系数;  $\rho_{2\lambda}$  为目标周围背景的光谱反射系数;  $\lambda$  为波长。

#### b) 大气对比衰减系数 $C_d$

大气对比衰减系数  $C_d$  定义式为

$$C_d = \left( 1 + \frac{L_A}{L_{ave}} \left( \frac{1}{\tau_d} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (22)$$

式中:  $L_A$  为夜天空的亮度;  $L_{ave}$  为观察目标和景物的亮度平均值;  $\tau_d$  为物镜透过率。

#### c) 光谱转换系数 $\alpha_\lambda$

转换系数  $\alpha_\lambda$  有如下定义<sup>[21]</sup>:

$$\alpha_\lambda = \frac{\bar{\alpha}(S, t) \cdot \alpha(e, A)}{\alpha(S, A) \cdot \bar{\alpha}(e, t)} \quad (23)$$

式中  $\alpha(S, A)$  和  $\alpha(e, A)$  定义为

$$\alpha(S, A) = \frac{\int A(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int A(\lambda) d\lambda}, \quad \alpha(e, A) = \frac{\int A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int A(\lambda) d\lambda} \quad (24)$$

式中  $A(\lambda)$  表示标准光源的相对光谱辐射通量。

式 (23) 中  $\bar{\alpha}(S, t)$  是阴极和景物的光谱匹配系数, 可以表示为

$$\bar{\alpha}(S, t) = \frac{\alpha(S, t_1) + \alpha(S, t_2)}{2} \quad (25)$$

式 (23) 中  $\bar{\alpha}(e, t)$  是人眼和景物的光谱匹配系数, 可以表示为

$$\bar{\alpha}(e, t) = \frac{\alpha(e, t_1) + \alpha(e, t_2)}{2} \quad (26)$$

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

$$\alpha(e, t_1) = \frac{\int P(\lambda)_1 V(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda)_1 d\lambda}, \quad \alpha(e, t_2) = \frac{\int P(\lambda)_2 V(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda)_2 d\lambda} \quad (27)$$

式中  $V(\lambda)$  为人眼视觉的相对视见函数。

#### d) 系统调制传递函数 $f_s(A_k)$

成像系统的调制传递函数一般可以用以下经验公式描述<sup>[22]</sup>

$$f_s(A_k) = \exp \left[ - (A_k / A_c)^{n'} \right] \quad (28)$$

式中:  $A_c$  为器件的空间频率;  $n'$  是受器件类型决定的器件指数。

#### e) 目标长宽比 $\varepsilon$

目标长宽比  $\varepsilon$  的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{\text{目标长}}{\text{目标宽} / 2N_e} \quad (29)$$

#### f) 输入窗上照度 $E_c$

输入窗上照度  $E_c$  的定义式为

$$E_c = \frac{1}{4} \rho E_0 \tau_0 \tau_d \left( \frac{D}{f_o'} \right)^2 \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{D}{f_o'} \right)^2 \right]^{-1} \quad (30)$$

式中:  $\rho$  为目标和背景反射率的平均反射率;  $E_0$  为夜间环境照度;  $\tau_0$  为大气对辐射能量的衰减程度, 即大气透过率;  $\tau_d$  为夜视仪物镜透过率;  $D$  为夜视仪物镜直径;  $f_o'$  为夜视仪物镜焦距。

#### 2) 改进视距模型

工业视距模型中引入分辨角因子  $\beta(G)$  来描述像增强器亮度增益对微光夜视系统视距的影响。加入人眼调制传递函数对视距模型进行修正后, 就可以用人眼调制传递函数替代  $\beta(G)$  来描述亮度增益对夜视系统视距的影响, 因此去掉工业视距模型中的  $\beta(G)$  影响因子。

人眼调制传递函数  $f_{eye}(A_{eye})$  是关于人眼分辨率  $A_{eye}$  的表达式, 人眼分辨率的单位为周期/度 (cycles/deg), 在一维情况下可将单位转换为线对/毫米 (lp/mm), 那么人眼分辨率  $A_{eye}$  就与系统分辨率  $A_k$  的单位一致。再按照线性系统理论, 将在同一

频率空间的各个分系统的响应相乘即可得到系统整体响应。另外,由于成像系统具有角放大率 $\Gamma$ ,故人眼响应将按相应角放大率拓展。因此,系统整体的调制传递函数可以表示为

$$f(A_k) = f_s(A_k) \cdot f_{eye}(A_k/\Gamma) \quad (31)$$

最后加入大气透过率 $\tau_0(A_k)$ 和噪声因子 $N_{FT}$ 的修正,得到的改进视距计算模型可以表示为

$$A_k = 700 \cdot \frac{C_0 C_d f_s(A_k) f_{eye}(A_k/\Gamma) D}{\Phi_{min} f_o'} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{4} \left( \frac{D}{f_o'} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \cdot \left[ \left( \frac{1 + I_d/I_s}{Q} \right) \left( 1 + \frac{2}{\delta_e} - \frac{1}{\delta_e g_m} \right) \right]^{-\frac{1}{4}} \cdot \left[ \frac{S_A \alpha_\lambda t \varepsilon \rho E_0 \tau_0(A_k) \tau_d R}{l} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

式中: $C_0$ 为观察目标和背景的初始对比度; $C_d$ 为大气对比衰减系数; $f_s(A_k)$ 为系统调制传递函数; $f_{eye}(A_k/\Gamma)$ 为人眼调制传递函数; $\Gamma$ 为微光成像系统角放大率; $D$ 为夜视仪物镜直径; $\Phi_{min}$ 为人眼的阈值信噪比; $f_o'$ 为夜视仪物镜焦距; $I_s$ 为阴极光电流; $I_d$ 为暗电流; $Q$ 为光电阴极量子效率; $\delta_e$ 为MCP微通道壁的二次电子发射系数; $g_m$ 为MCP电流增益; $S_A$ 为阴极积分灵敏度; $\alpha_\lambda$ 为光谱转换系数; $t$ 为人眼所需的能量积累时间; $\varepsilon$ 为观察目标类型的长宽比; $\rho$ 为目标和景物平均反射率; $E_0$ 为夜间环境照度; $\tau_0(A_k)$ 为大气透过率; $\tau_d$ 为夜视仪物镜透过率; $R$ 为微通道板的有效孔径; $l$ 为微通道板孔间距。

可以看出,最终建立的改进视距模型不仅考虑了环境、背景和目標、微光夜视系统自身等因素的影响,还考虑了大气传输特性、像增强器噪声特性和人眼视觉传递特性的影响,解决了原有视距模型的不足和局限,使改进的视距模型更加完善,这对于微光夜视仪的设计、评估和应用具有指导意义,可以推动微光夜视仪的改进、优化和提高。

## 2 修正视距模型视距计算及分析

本节将结合某超二代直视型微光夜视仪在南京野外晴朗星光条件下(照度约为 $10^{-3}$  lx)的观察实验进行分析,观察背景为透空,观察对象为身着迷彩服饰的人(身高1.75 m,肩宽0.5 m)和涂有迷彩油漆的车辆(长4 m,宽2 m)。使用本文改进的新视距模型进行视距计算过程中所需的部分参数如表3和表4所示。

表3 视距模型计算所需参数

Table 3 Parameters required for calculation

| Parameter | $D/\text{mm}$             | $f_o'/\text{mm}$        | $Q$                       | $\delta_e$      | $g_m$    | $t/\text{s}$   |
|-----------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------|----------|----------------|
| Value     | 18                        | 26                      | 0.3                       | 8               | 10813.17 | 0.2            |
| Parameter | $H_t/\text{m}$            | $N_e$                   | $\varepsilon$             | $E_0/\text{lx}$ | $\tau_d$ | $R'/\text{mm}$ |
| Value     | person: 0.5<br>vehicle: 2 | person: 4<br>vehicle: 6 | person: 28<br>vehicle: 24 | $10^{-3}$       | 0.8      | 9.7            |
| Parameter | $l/\text{mm}$             | $\Gamma$                | $X_0/\text{deg}$          |                 |          |                |
| Value     | 10                        | 3.4                     | 28                        |                 |          |                |

表4 像增强器的调制传递函数

Table 4 Modulation transfer function of image intensifier

| $A_k/(\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1})$ | 2.5  | 7.5  | 15   | 25   | 30   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|
| MTF                                  | 0.86 | 0.65 | 0.42 | 0.22 | 0.15 |

如图5所示,对表4中离散的像增强器调制传递函数值进行拟合,可得 $A_c = 17.12$ ,  $n' = 1.23$ ,即 $f_s(A_k) = \exp[-(A_k/17.12)^{1.23}]$ 。

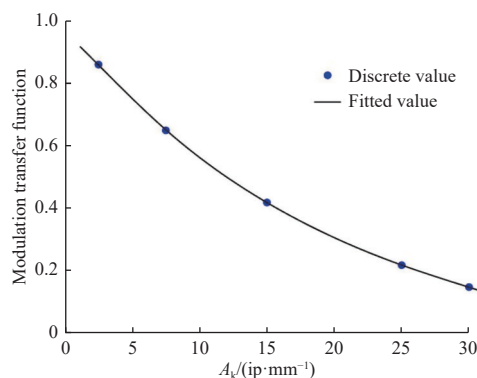


图5 像增强器 MTF 拟合曲线

Fig. 5 MTF fitting curve of image intensifier

下面对视距计算过程中所需的其他参量进行补充说明。对于简化人眼复合模型 $f_{eye}(A_k/\Gamma)$ ,结合表3中的参数值和式(30)计算得到的光电阴极输入窗上的照度,将其与电流增益相乘即可得到荧光屏实际亮度 $L$ 以及人眼瞳孔直径 $d_e$ ,从而确定人眼的调制传递函数 $f_{eye}(A_k/\Gamma)$ ;对于人眼阈值信噪比 $\Phi_{min}$ ,在工业视距计算模型中,以人眼为最终输出端,而引入人眼调制传递函数后,微光夜视系统的最终输出端应为人眼视网膜,文献中<sup>[23]</sup>指出,如果58~145个蓝绿光的光子进入人眼,那么实际到达并作用于视网膜上产生刺激的光子数约为5~14个,本文取人眼阈值信噪比 $\Phi_{min}$ 为0.2;微光夜视系统像增强器光阴极电流 $I_s$ 远大于暗电流 $I_d$ ,因此 $I_d/I_s$ 的值可以近似为0;像增强器阴极材料为New S<sub>25</sub>,根据图6所示的阴极光谱响应分布曲线、人眼的相对视见函数 $V(\lambda)$ 和标准光源的相对

光谱响应分布  $A(\lambda)$ , 可以计算得到阴极的积分灵敏度  $S_A = 600 \mu\text{A/lm}$ ; 大气透过率  $\tau_0(A_k)$  中的能见度  $V$  按照南京年平均能见度  $6.78 \text{ km}$  计算, 即  $V = 6.78 \text{ km}$ <sup>[24]</sup>。

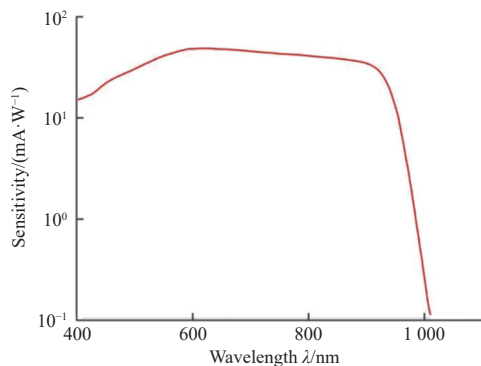


图 6 材料为 NEW S<sub>25</sub> 的光阴极的光谱灵敏度

Fig. 6 Spectral sensitivity of NEW S<sub>25</sub> photocathode

下面分析和讨论与光谱分布相关的参数, 图 7 为满月光和晴朗星光环境条件下的辐射光谱分布曲线图。图 8 为典型背景绿色草木的反射率曲线图。

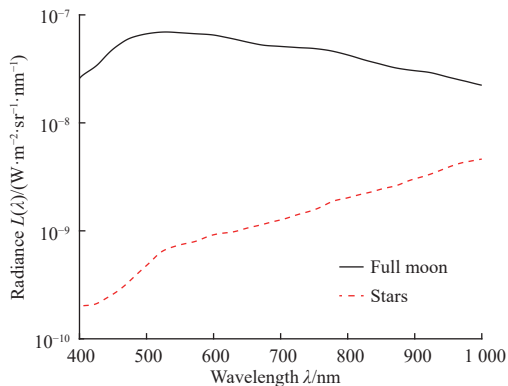


图 7 满月光和晴朗星光的辐射光谱分布曲线

Fig. 7 Radiation spectral distribution curves of full moonlight and clear starlight conditions

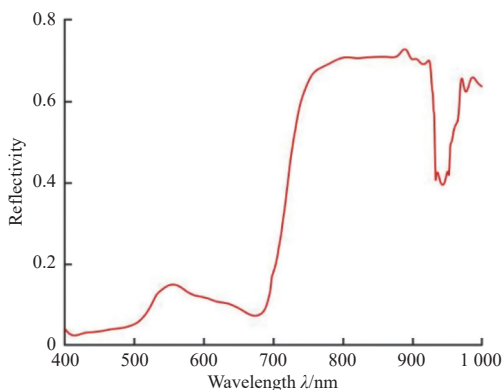


图 8 绿色草木的光谱反射率

Fig. 8 Spectral reflectance of green vegetation

不同夜空环境中各波长下的辐射强度乘以背景对应波长的光谱反射系数, 即可得到对应的背景反射辐射光谱分布, 那么绿色草木背景、满月光和晴朗星光条件下, 其反射辐射光谱分布如图 9 所示。

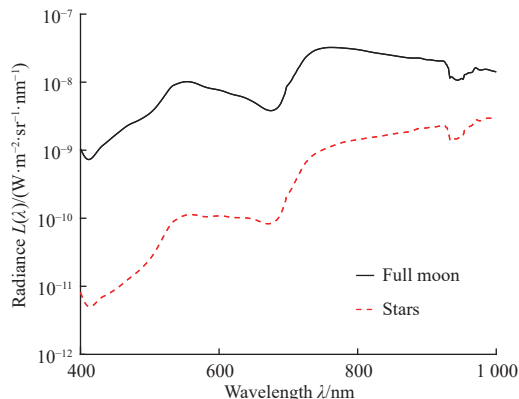


图 9 绿色草木背景条件下晴朗星光和满月光的反射辐射照度

Fig. 9 Reflected radiation illuminance of clear starlight and full moonlight under green vegetation scene conditions

基于上述理论分析, 对 New S<sub>25</sub> 光电阴极的光谱响应曲线进行归一化后, 即可得到满月光和晴朗星光、绿色草木背景条件下对应的光谱匹配系数, 如图 10 所示。图 10 中, 曲线 S 表示 New S<sub>25</sub> 光电阴极光谱响应的归一化曲线, 曲线 SPMOON 和曲线 SPSTAR 分别表示绿色草木背景条件下, 材料为 New S<sub>25</sub> 的光阴极在满月光和晴朗星光环境条件下的光谱转换系数。

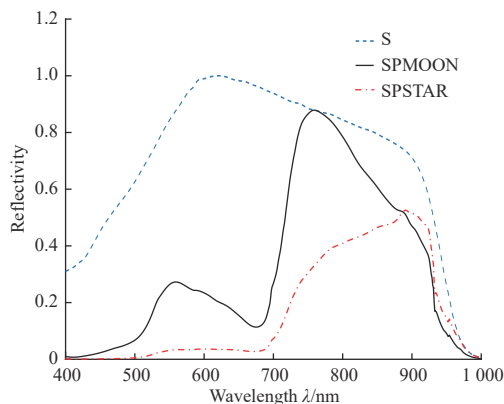


图 10 New S<sub>25</sub> 光电阴极绿色草木背景条件下晴朗星光和满月光的谱转换系数  $\alpha_\lambda$  的计算

Fig. 10 Calculation of spectral conversion coefficient  $\alpha_\lambda$  of clear starlight and full moonlight under green vegetation scene conditions of New S<sub>25</sub> photocathode

根据上述对夜天空辐射光谱分布、景物的光谱反射系数、光电阴极的光谱匹配等因素的分析,可以得到不同环境照度下观察目标和背景的

初始对比度  $C_0$ 、大气对比衰减系数  $C_d$ 、目标和背景平均反射率  $\rho$  以及光谱转换系数  $\alpha_\lambda$ , 结果如表 5 所示。

表 5 与光谱分布有关的参数计算结果

Table 5 Calculation results for parameters related to spectral distribution

| Background       | Full Moonlight |         |                  |         | Stars       |         |                  |         |
|------------------|----------------|---------|------------------|---------|-------------|---------|------------------|---------|
|                  | Transparent    |         | Green vegetation |         | Transparent |         | Green vegetation |         |
|                  | Man            | Vehicle | Man              | Vehicle | Man         | Vehicle | Man              | Vehicle |
| $\rho$           | 0.5778         | 0.5484  | 0.2404           | 0.211   | 0.5844      | 0.5456  | 0.3686           | 0.3298  |
| $C_0$            | 0.749          | 0.8072  | 0.1767           | 0.3156  | 0.6932      | 0.8158  | 0.2403           | 0.4894  |
| $C_d$            | 0.943          | 0.9402  | 0.8732           | 0.858   | 0.626       | 0.6098  | 0.6136           | 0.4858  |
| $\alpha_\lambda$ | 0.3924         | 0.2678  | 0.66             | 0.3645  | 1.3715      | 0.7917  | 2.636            | 1.0935  |

将上述参数代入改进的视距模型, 即式 (32), 可以得到一个关于系统分辨率  $A_k$  的超越方程, 通过二分法得到  $A_k$  的近似值, 再将  $A_k$  代入式 (19) 就可以计算得到微光夜视仪的视距估算结果。

下面分别使用工业视距模型、本文改进的视距模型进行视距估算, 并与相应直视型微光夜视系统的野外实测数据进行比较, 表 6 给出晴朗星光透空背景条件下对目标人和车的视距估算结果。

表 6 晴朗星光透空背景条件下微光夜视仪对人和车辆的视距

Table 6 Apparent distance of LLL night vision equipment to people and vehicles under clear starlight and full moonlight conditions m

|                   | Man   | Vehicle |
|-------------------|-------|---------|
| Experimental data | 100.0 | 200.0   |
| Original model    | 87.0  | 208.0   |
| Modified model    | 92.14 | 205.60  |

1) 表 6 中显示两种视距模型的视距估算结果相近, 相差不超过 5 m。目标为人时, 工业视距模型和本文改进视距模型相对实测数据的相对误差分别为 13% 和 7.86%; 目标为车辆时, 工业视距模型和本文改进视距模型相对实测数据的相对误差分别为 4% 和 2.8%。可见改进视距模型的视距仿真结果相较于工业视距模型更接近实验实测结果。

2) 表 6 中两种视距模型对人和车的仿真结果与实验结果分别呈现负偏差和正偏差, 经过对视距模型的分析, 这个现象很可能与本文目标尺寸  $H_t$  的选取方法有关。对于目标人, 身高 1.75 m, 肩

宽 0.5 m, 其长宽比为 3.5; 对于车辆, 长 4 m, 宽 2 m, 其长宽比为 2.0。而本文中  $H_t$  取的是目标短边, 这可能对于长宽比为 3.5 的人而言目标尺寸选取得略小, 而对于长宽比为 2.0 的车辆而言目标尺寸选取得略大, 因此造成了两种视距模型对人和车的仿真结果与实验结果分别呈现负偏差和正偏差。但这并不能说明本文选取目标短边作为目标尺寸是不合理的, 这是因为目标尺寸受到目标外形的影响, 而目标外形千变万化, 因此目标尺寸  $H_t$  的取法各文献也不相同, 如取目标宽度、目标高度、目标短边、目标长边、 $\sqrt{\text{面积}}$ 、 $\sqrt{\text{长} \times \text{宽}}$  等, 无法使用其中一种目标尺寸取法来适用于所有目标类型, 而本文目标尺寸的取法和工业视距模型中目标尺寸的取法统一, 严格选取目标短边<sup>[21]</sup>。

3) 工业视距模型的视距计算结果是在大气透过率取定值  $\tau_0=0.9$  的情况下得到的。设实验环境条件下, 对目标车的真实大气透过率为  $\tau_{\text{vehicle}}$ , 对目标人的真实大气透过率为  $\tau_{\text{person}}$ , 而上述定值可能刚好介于  $\tau_{\text{vehicle}}$  与  $\tau_{\text{person}}$  之间, 即  $\tau_{\text{vehicle}} < \tau_0 = 0.9 < \tau_{\text{person}}$ , 而将改进视距模型的视距仿真结果代入式 (1), 求得对车和对人的大气透过率分别为 0.889 和 0.949, 更接近真实大气状况, 这是改进视距模型的视距仿真结果相较于工业视距模型更接近实验实测结果的一个原因。另外, 本文引入了像增强器整体的噪声因子数学模型和人眼传递函数, 对系统传递函数和对视距模型进行修正, 这使得改进的视距模型更接近实际情况。

结合上述对实验结果的分析讨论, 可见按照本文修正方法改进的视距模型相较于工业视距模型具有更好的准确性和适应性。

### 3 结论

微光夜视技术在历经几十年的发展之后,已经广泛应用于工业、农业、国防建设等领域,建立一个统一实用的视距计算模型对于微光夜视仪的设计、制造有着重要的指导作用。本文对工业视距模型进行修正,重点讨论了大气透过率、像增强器噪声因子、人眼视觉传递特性对微光夜视系统视距的影响,通过与工业视距模型的视距仿真结果和野外实测数据的对比分析,本文改进视距模型相较于工业视距模型更合理、完善,在低照度条件下更接近野外实测数据。这对于微光夜视系统的设计、评估和应用具有指导意义,可以推动微光夜视仪的改进、优化和提高。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] DEVRIES H L. The quantum character of light and its bearing upon threshold of vision[J]. *Physica*, 1954, 7(7): 553-556.
- [3] COLTMAN J W, ANDERSON A E. Noise limitations to resolving power in electronic imaging[J]. *Proceedings of the IRE*, 1960, 48(5): 858-865.
- [4] SCHAGEN P. Electronic aids to night vision[J]. *Electronics and Power*, 1975, 21(7): 437.
- [5] ROSELLF A, WILLSON R H. Basics of detection recognition and identification in electro-optical formed imagery[J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1973, 33: 107-119.
- [6] SCHNITZLER A D. Visual systems for night vision[M]//*Photoelectronic Imaging Devices*. Boston, MA: Springer US, 1971: 89-108.
- [7] RICHARDS E A. Limitations in optical imaging devices at low light levels[J]. *Applied Optics*, 1969, 8(10): 1999-2005.
- [8] BLACKLER F G. Image intensifiers and night viewing system performance[C]//*Electron-Optics/Laser International'82 UK Conference Proceedings*. London: Butterworth Scientific Press, 1982: 130-139.
- [9] 邹异松. 成像器件的图象探测特性[J]. *北京工业学院学报*, 1982, 2(1): 17-28.  
ZOU Yisong. Image detection characteristics of imaging devices[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1982, 2(1): 17-28.
- [10] 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.  
AI Kecong, ZHOU Liwei, ZENG Guilin, et al. Research on the new threshold detection theory and apparent distance detecting equation for low light level imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(5): 1-6.
- [11] 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(6): 761-765.  
LIU Lei, CHANG Benkang. The revised formula for visual range of low light level imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 761-765.
- [12] 张竹平, 李力, 贾星蕊, 等. 微光夜视仪分辨力计算方程的修正[J]. *红外技术*, 2014, 36(11): 930-933.  
ZHANG Zhuping, LI Li, JIA Xingrui, et al. Correction on resolution calculation formula for low light level night vision device[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 930-933.
- [13] 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.  
LIU Songtao, WANG Bolin, WANG Longtao. Estimation and simulation of operation range for low-light-level night vision device[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(4): 462-465.
- [14] 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-view low-light-level night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 61-70.
- [15] 蒋先进. 微光电视[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984: 389-411.  
JIANG Xianjin. Low-light-level television[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1984: 389-411.
- [16] BELL R L. Noise figure of the MCP image intensifier tube[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1975, 22(10): 821-829.
- [17] JACOBSON R E. An evaluation of image quality metrics[J]. *The Journal of Photographic Science*, 1995, 43(1): 7-16.
- [18] BARTEN P G J. Formula for the contrast sensitivity of the human eye[J]. *SPIE*, 2003, 5294: 231-238.
- [19] CAMPBELL F W, ROBSON J G. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings[J]. *The Journal of*

- [Physiology](#), 1968, 197(3): 551-566.
- [ 20 ] WATANABE A, MORI T, NAGATA S, et al. Spatial sine-wave responses of the human visual system[J]. [Vision Research](#), 1968, 8(9): 1245-1263.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 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: 234-235.
- XIANG Shiming, NI Guoqiang. The principle of photo-electronic imaging devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 234-235.
- [ 23 ] 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: 31-51.
- BAI Tingzhu, JIN Weiqi. Principle and technology of photoelectric imaging[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2006: 31-51.
- [ 24 ] 于超, 张蕾. 南京北郊大气能见度影响因子研究[J]. 三峡生态环境监测, 2019, 4(1): 56-60.
- YU Chao, ZHANG Lei. The influence factors of atmospheric visibility in Nanjing's northern suburb[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2019, 4(1): 56-60.