

文章编号: 0253-2239(2003)06-0761-5

微光成像系统视距理论公式的修正

刘 磊 常本康

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 介绍了微光成像系统视距理论的基本概念,在对微光成像系统视距探测方程推导的基础上,分析了各参量间的关系及其对整体性能的影响,从大气透过率和光谱匹配等诸多方面进行修正,建立了更为实用和完善的视距探测方程,并结合车辆驾驶夜视仪进行了视距估算,验证了经修正后的视距公式的实用性,为微光成像系统的优化设计以及寻求实现中远距离观察的最优技术途径提供了理论帮助,这对微光成像系统的改进、提高和发展也具有一定的指导意义。最后提出了一些改进微光成像系统视距性能的途径。

关键词: 微光夜视系统; 视距探测方程; 光谱匹配系数; 大气透过率

中图分类号: TP802⁺.5; TN223 文献标识码: A

1 引 言

视距是微光成像系统综合性能的象征,是系统各个参量的直接反映,也是总体设计考虑的依据和检验成品性能的参考。

经典的微光成像视距理论模型是在理想成像系统和微光视觉理论的基础上推导出来的。Rose 和 Devries 是微光成像系统视距理论研究的先驱,其后由 Coltman、Anderson、Pathep、Richards 和 Schagen 等人又做了进一步发展。接着许多专家学者对理想成像系统的探测方程又作了进一步修正和改进,以使其尽量与实际相一致,从而导出了许多不同形式的探测方程,这些方程称为实际成像系统探测方程。其中代表性的有: Richards^[1~3]、Rosell^[4,5]、Schnitzler^[6]、Blackler^[7] 和 Richard^[8] 等人导出的方程,综合这些方程最终建立了经典微光成像系统的视距理论。

实际探测方程是对简单的典型几何图案导出的,存在一定的局限性,没有正确反映光量子起伏理论和线性滤波理论对微光成像系统共同作用的规律,微光成像系统对目标亮度增强的作用和当增益不同时对系统观察性能的影响,系统放大视角的作用和系统放大率的影响,系统信噪比和对比度传递的影响,微光成像系统终端接收器—人眼的阈值特性及其对系统探测性能的影响等,所以当微光成像

系统用于野外观察,如对视距进行正确评估,必须考虑对实际探测方程进行修正。

本文在对微光成像系统视距探测方程推导的基础上,从大气透过率、目标长宽比、对比度、反射率和光谱匹配等诸多方面进行修正,建立了更为实用和完善的视距探测方程,并结合车辆驾驶夜视仪进行了视距估算,验证了经修正后的视距公式的实用性。最后提出了一些改进微光成像系统视距性能的途径,这对微光成像系统的优化设计,寻求实现中远距离观察的最优技术途径提供了理论帮助,对微光成像系统的改进、提高和发展具有一定的意义。

2 经典微光成像系统视距理论

经典微光成像系统的阈值预测理论认为:只要通过成像系统所得到的景物图像给人眼提供的视觉信噪比大于人眼的阈值信噪比,目标物就能够被观察者发现。通常按照光量子随机起伏理论,导出在成像系统第一光敏面上信噪比与目标亮度、对比度和分辨率的关系。当目标亮度、对比度一定时,根据目标的形状和要求识别的概率,以相应的人眼阈值信噪比来代替第一光敏面的输出信噪比,并代入确定的系统参量值,即可求出系统的分辨率。然后根据目标的大小尺寸,以及对目标发现、识别、看清的不同要求,代入系统分辨率和探测距离的关系式,求出相应的探测距离,从而达到预测微光成像系统探测性能和探测距离,以及一定距离的目标能否被发现、识别或看清的目的。探测距离为

$$R_L = f'_0 A_k H_t / N_e, \quad (1)$$

E-mail: liul133-cm@sina.com.cn

收稿日期:2002-06-07; 收到修改稿日期:2002-07-02

式中 f'_o 为物镜焦距 (mm), H_t 为目标尺寸大小 (m), N_e 为发现、识别或看清目标所需的空间频率, A_k 为系统分辨率, 可以由下式表示^[9]:

$$A_k = 1.14 \times 10^3 \frac{CD}{f'_o} \left(\frac{St \bar{\rho} E_o \tau_o}{F_\Phi} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中 C 为对比度, D 为物镜的直径 (mm), S 为光电阴极的积分灵敏度 ($\mu A/lm$), t 为系统积累时间, $\bar{\rho}$ 为景物的平均反射率, τ_o 为物镜的透过率, E_o 为夜天空照度 (lx), F_Φ 为像增强器的噪声功率因子。

但是这个微光成像系统的一般视距理论公式并没有考虑到目标、背景和夜天空辐射光谱的影响, 也没有考虑到大气和仪器对对比度的衰减等因素。因此, 用该理论公式计算仪器视距同实际的测试结果有较大的差距。再者, 由于野外试验的环境条件复杂多变, 测试条件也常常受限制, 仪器在不同的野外

条件下所得到的试验数据离散性也较大。因此有必要对一般的理论计算公式进行修正, 以期较方便并符合实际地评判仪器的性能。

3 微光成像系统视距理论公式的修正与补充

3.1 观察水平的确定

观察水平是将系统性能与人眼视觉相结合的一种视觉划分方法。目前公认的划分方法是 Johnson 准则^[10], 如表 1 所示。这里各观察水平所需要的条带数 N_o 是在 50% 的概率下得到的。因此, 其它概率对应的条带数将有一些改变。Rathes^[10] 由实验得出探测概率 (P_e) 与目标所包含条带数的关系如图 1 所示。

Table 1 The Johnson's criterion

The observation level	Definition	The line pairs needed N_o
Detection	Detecting a target in the visual field	$2.0^{+1.0}_0$
Recognition	Classifying the target (such as tank, truck, human etc)	$8.0^{+1.6}_1$
Identification	Distinguishing the type or other character of the target (such as T-72 tank, leopard II tank etc)	$12.0^{+3.2}_{-2.8}$

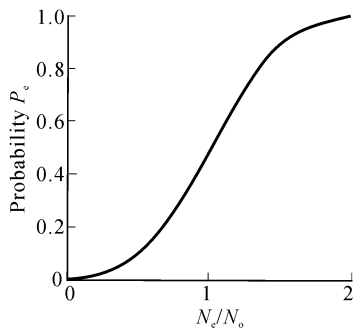


Fig. 1 The relationship between the observation probability P_e and the target line pairs N_e .

利用概率积分拟合, 可将条带数 N_e 与概率 P_e 的关系表示为

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{(N_e - N_o)/\sigma_e} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz. \quad (3)$$

Table 2 The estimated data^[10]

The observation level	Detection	Recognition	Identification
The value of σ_e	0.625	1.882	3.529

3.2 目标尺寸与长宽比的修正

对于目标尺寸 H_t 取目标短边。(2)式是在长宽比为 2:1 和阈值信噪比 $\Phi_{min} = 1.1$ 的情况下推导出的, 当目标长宽比为 ϵ 时, 目标细节面积 $a = 10^{-6} \epsilon / (4A_k^2)$, 相应地有

$$A_k = 0.884 \times 10^3 \frac{CD}{\Phi_{min} f'_o} \left(\frac{St \epsilon \bar{\rho} E_o \tau_o}{F_\Phi} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

3.3 大气透过率的影响

在微光夜视条件下, 波长 $\lambda \approx 0.38 \sim 1.2 \mu m$, 观察(识别)距离 $R_L = 0.1 \sim 1 km$, 可以认为这段大气是均匀的。此时大气透过率随波长的变化如表 3^[11] 所示, 其中, 大气条件取一般能见度, 标准晴朗气象条件, 水平能见距离为 23.5 km。对于其它情况, 可按下式计算大气透过率 τ_d ^[11]:

$$\tau_d = \exp\left(-\frac{3.912 R_L}{V}\right), \quad (5)$$

式中 V 为能见距离。

Table 3 The atmosphere transmissivity τ_d vs. the wavelength λ and the visual range R_L

Wavelength λ / μm	Atmosphere transmissivity τ_d/km		
	Visual range $R_L = 0.1$	$R_L = 0.5$	$R_L = 1$
0.38	0.972	0.87	0.76
0.40	0.975	0.88	0.78
0.50	0.982	0.91	0.83
0.60	0.984	0.92	0.85
0.70	0.986	0.93	0.87
1.00	0.988	0.94	0.89
1.20	0.989	0.95	0.90

考虑到大气透过率的影响,(4)式成为

$$A_k = 0.884 \times 10^3 \frac{CD}{\Phi_{\min} f'_o} \left(\frac{St\epsilon \bar{\rho} E_0 \tau_o \tau_d}{F_\Phi} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

3.4 对比度的修正

由于目标与背景的初始对比度和大气对比衰减系数不随空间频率而变化,因此,在人眼处目标与背景的可见对比度 C'' 为

$$C'' = C_0 C_d C_y, \quad (7)$$

式中 C_0 为目标与背景的初始对比度, C_d 为大气对比衰减系数, C_y 为仪器对比衰减系数。

考虑到光谱的影响,目标与背景的初始对比度为^[9]

$$C_0 = \frac{\left| \int S(\lambda) P(\lambda) \rho_{1\lambda} d\lambda - \int S(\lambda) P(\lambda) \rho_{2\lambda} d\lambda \right|}{\int S(\lambda) P(\lambda) \rho_{1\lambda} d\lambda + \int S(\lambda) P(\lambda) \rho_{2\lambda} d\lambda}, \quad (8)$$

式中 $S(\lambda)$ 为光电阴极的相对光谱响应; $P(\lambda)$ 为辐射源的相对辐射通量; $\rho_{1\lambda}$ 和 $\rho_{2\lambda}$ 分别为目标和背景的光谱反射系数; λ 为波长。

大气对比衰减系数 C_d , 即大气对比传递函数为^[9]

$$C_d = \frac{1}{1 + K_A (1/\tau_d - 1)}, \quad (9)$$

式中 K_A 为天空景物亮度比, $K_A = L_A/L_{ave}$, 其中 L_A 和 L_{ave} 分别为天空亮度和目标与背景的平均亮度。仪器对比衰减系数 C_y 可从仪器调制传递函数求出^[7],

$$C_y = \frac{8}{\pi^2} M(A_k) = \frac{8}{\pi^2} M_o(A_k) M_i(A_k) M_e(A_k), \quad (10)$$

式中 $M(A_k)$ 为全系统对应空间频率为 A_k 时的调制传递函数(MTF)值, $M_o(A_k)$ 、 $M_i(A_k)$ 和 $M_e(A_k)$ 分别为物镜、像增强器和目镜对应空间频率为 A_k 时的调制传递函数值。(A_k 是系统的分辨率, 也就是通过像增强器成像后的条形图案的空间频率, 单位是 mm^{-1})。

于是(6)式修正为

$$A_k = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\Phi_{\min} f'_o} \left(\frac{St\epsilon \bar{\rho} E_0 \tau_o \tau_d}{F_\Phi} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

3.5 反射率的修正

景物平均反射率取为目标积分反射率 ρ_1 和背

景积分反射率 ρ_2 的平均值, 即

$$\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2, \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \int P(\lambda) \rho_{1\lambda} d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda, \\ \rho_2 &= \int P(\lambda) \rho_{2\lambda} d\lambda / \int P(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (13)$$

3.6 光谱匹配的修正

在微光夜视系统分析中, 光谱分布的影响是一个重要方面, 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^[12]。

由于各种目标及野外光源的光谱分布与标准光源的光谱分布不同, 所以同一光电阴极对它们的响应灵敏度也就不同。而光电阴极的积分灵敏度 S_A 是在室内用标准光源 A 测得的, 因此, 在对微光夜视系统进行视距评估时, 应把这个 S_A 转化为对景物反射辐射的积分灵敏度 S_t , 即

$$S_t = S_A \cdot \alpha_\lambda, \quad (14)$$

式中 α_λ 为标准光源转换到对景物反射辐射的光谱转换系数^[9]。

$$\alpha_\lambda = \frac{\bar{\alpha}(S, t) \cdot \alpha(e, A)}{\alpha(S, A) \cdot \bar{\alpha}(e, t)}, \quad (15)$$

式中 $\alpha(S, A)$ 为光电阴极与标准光源的光谱匹配系数; $\alpha(e, A)$ 为光适应眼与标准光源的光谱匹配系数;

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

为光电阴极与景物的光谱匹配系数, 即光电阴极与目标和背景光谱匹配系数 $\alpha(S, t_1)$ 和 $\alpha(S, t_2)$ 的平均值;

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

为光适应眼与景物的光谱匹配系数, 即光适应眼与目标和背景光谱匹配系数 $\alpha(e, t_1)$ 和 $\alpha(e, t_2)$ 的平均值。

经过目标长宽比、大气透过率、对比度衰减及光谱匹配等一系列修正后, 微光夜视系统的空间分辨率 A_k 为

$$A_k = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\Phi_{\min} f'_o} \left(\frac{S_A \alpha_\lambda t\epsilon \bar{\rho} E_0 \tau_o \tau_d}{F_\Phi} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

4 车辆驾驶夜视仪的视距估算

利用上面的修正过的视距公式,可以对车辆驾驶夜视仪进行视距估算。由于野外视距受外界环境影响较大,在不同的气象和环境条件下,视距可以从几十米变化到几百米,而且气象和环境又随时间和地点不断变化,所以在对车辆驾驶夜视仪进行视距估算时,选取比较典型的气候条件和特定的目标背景。具体的计算步骤如下。

4.1 确定环境条件

环境照度为满月光和晴朗星光,此时夜天空照度 E_0 分别为 10^{-1} lx 和 10^{-3} lx,天空亮度 L_A 分别为 10^{-2} cd/m² 和 10^{-3} cd/m²。取大气透过率 $\tau_a=0.9$ 。目标分别为穿军装的人和涂暗绿色涂层的车辆;背景分别为透空和绿色草木,其中背景透空时反射系数为 1。

4.2 确定系统参量

物镜直径 $D=22$ mm,物镜焦距 $f'_o=27.5$ mm;取物镜透过率 $\tau_o=0.8$;像增强器噪声功率因子一般在 1~4 之间,对于一代像增强器 $F_\Phi=2$ 。人眼阈值信噪比 $\Phi_{\min}=2$,人眼积累时间 $t=0.2$ s;目标尺寸 H_t 对人为 0.5 m(为人肩宽),对车辆为 2 m(为车高);采用空间频率 $N_e=4$ (对人)和 $N_e=6$ (对车辆);对于人取目标长宽比 $\epsilon=28$;对于车辆,取 $\epsilon=24$;光电阴极的积分灵敏度 $S_A=400$ μ A/lm。

4.3 计算与光谱分布有关的参量

根据夜空辐射光谱分布、景物的光谱反射系数、光电阴极的光谱响应、相对视见函数 $V(\lambda)$ 和标准光源的相对光谱分布 $A(\lambda)$,就可得到不同环境照度下、不同目标和背景所对应的平均反射率 $\bar{\rho}$ 、大气对比衰减系数 C_d 、目标与背景初始对比度 C_0 、光电阴极与标准光源和景物的光谱匹配系数 $\alpha(S,A)$ 和 $\bar{\alpha}(S,t)$ 、光适应眼与标准光源和景物的光谱匹配系数 $\alpha(e,A)$ 和以及光谱转换系数 α_λ 。

4.4 计算系统分辨率及视距

将上述各参量代入(2)式中,调制传递函数 $M(A_k)$ 采用文献[13]的经验公式,得到的计算结果与系统调制传递函数相交,就可得到系统分辨率 A_k 。其中,在照度为满月光并且背景为透空时,即高照度和高对比的情况下, A_k 取其极限分辨率 30 mm⁻¹。最后将系统分辨率 A_k 、物镜焦距 f'_o 、目标尺寸大小 H_t 以及识别人和车辆所需的不同空间频率 N_e 代入(1)式中,就可得到不同环境照度和不同目标背景下的车辆驾驶夜视仪的视距 R_L ,如表 4 所示。为了便于比较,表中同时列出了利用未经修正的视距理论公式计算时得到的视距 R'_L ,即不考虑室内外光谱分布差异对系统参量的影响和大气对辐射传输的影响时,得到的相应视距。

Table 4 The visual range of the LLL night vision goggle for drive

$P(\lambda)$	Full moonlight				Clear starlight			
	Transparent		Green vegetation		Transparent		Green vegetation	
Background	Man	Car	Man	Car	Man	Car	Man	Car
Target	Man	Car	Man	Car	Man	Car	Man	Car
A_k/mm^{-1}	30	30	27.1	28.8	22.6	21.7	13.8	15.5
R_L/m	103	275	93	264	78	199	47	142
R'_L/m	103	275	99	275	87	236	57	188

从表中可以看出,修正前后的视距理论公式计算结果相比较,在满月光下两者相差不大,这是因为仪器在高照度下夜视功能得到了较充分的发挥。而在晴朗星光下,两者结果相差较大,尤其是目标为车辆时的情况。因为在低照度下,不仅大气对比衰减系数的影响较大,而且由光谱分布差异产生的影响也很大。由此可见,对一般视距理论公式进行全面地修正是必要的。

结论 通过一系列的完善和补充,可以看出经修正后的视距计算公式(16)是比较全面的微光成像系统探测方程。它把目标参量(目标大小,反射率及初始对比度)、天气情况(地面照度及大气透过率)、仪器

的物镜参量(直径、焦距及透射率)及器件参量(光电阴极积分灵敏度、光谱匹配系数、系统的积累时间及对比度传递衰减)等因素都有机全面地联系起来,从而可以用来分析各因素之间的关系及其对整体性能、观察距离的影响和作用,进行总体分析与计算。从这个公式的推导过程中,可以看出增大微光夜视仪视距的途径有:(1)增大物镜直径,尽可能多地利用来自目标的辐射能。但不能过分增大物镜直径,因为它会使系统体积、重量和成本增大,工艺变得复杂。(2)改善目标与背景的对比度。实际上目标与背景的对比度是客观的,无法改变,但可利用有良好对比度的区域。(3)提高光电阴极的积分灵敏度并提高像增强器光谱响应与夜天空的光谱匹配系数,

这可通过改进光电阴极材料和工艺来达到目的。(4)利用图像处理技术降低噪声,可以提高像增强器的信噪比。根据像增强器的噪声功率因子 F_{Φ} 的定义, $F_{\Phi} = \Phi_{in}^2 / \Phi_{out}^2$ (其中 Φ_{in} 和 Φ_{out} 分别为输入信噪比和输出信噪比),故噪声功率因子随着噪声的减少而减少,再根据(2)式中分辨率和 F_{Φ} 的关系,就可以得到增大的系统分辨率,从而作用距离也随之提高。

参 考 文 献

- Richards E A. Fundamental limitations in the low light level performance of direct-view image intensifier systems. *Infrared Phys.*, 1968, **8**(1):101~115
- Richards E A. Limitations in optical imaging devices at low light levels. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10):1999~2005
- Richards E A. Contrast-enhancement in imaging devices by selection of input photosurface spectral response. *AEEP*, 1969, **28B**:661~675
- Rosell F A. The limiting resolution of low light level imaging sensors. *Photoelectron Imaging Devices*, 1971. 308~329
- Rosell F A, Willson R H. Basics of detection, recognition and identification in electro-optical formed imagery. *Proc. SPIE*, 1972, **33**:107~119
- Schnitzler A D. Low light level performance of visual system. *AD. 725831*. 1971. 55
- Blackler F G. Image intensifiers and night viewing system performance. *Electron-Optics/Laser International '82UK Conference Proceedings*. London: Butterworth Scientific Press, 1982. 130~139
- 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 photocathode. *Acta Electronica*, 1977, **20**(4):353~368
- Li Wei. *Visual Range Evaluation of LLL Night Vision System and Its Application*(微光夜视系统视距评估及应用研究). [Dr dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2001 (in Chinese)
- Rosell F A. The fundamentals of thermal imaging systems. *Armed Service Technical Information Agency Documents*. AD-A 073763. 1979
- Jiang Xianjin. *The LLL Television*(微光电视). Beijing: National Defense Industry Press, 1984. 389~411 (in Chinese)
- Li Wei. Spectral matching factors between GaAs and multialkali photocathodes and reflective radiation of objects. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(5):674~678
- Xiang Shiming, Ni Guoqiang. *The Principle of the Photoelectric Imaging Devices*(光电子成像器件原理). Beijing: National Defense Industry Press, 1999. 234~235 (in Chinese)

The Revised Formula for Visual Range of Low Light Level Imaging System

Liu Lei Chang Benkang

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

(Received 7 June 2002; revised 2 July 2002)

Abstract: The fundamental conception about visual range of low light level (LLL) imaging system is described. Based on the common apparent distance detecting equation, a more practicable and reliable detecting equation is established by using the factors, such as atmospheric transmissivity, spectral matching factor, etc. The relations of parameters, which have an influence on performances of system, are analyzed. The visual range of the night vision goggle under the specific circumstance is estimated which proves the revised apparent distance detecting equation is effective and the design of the system is feasible. Some approaches to improve the LLL imager's performance are presented.

Key words: LLL night vision system; apparent distance detecting equation; spectral matching factor; atmospheric transmissivity