

文章编号: 0253-2239(2005)10-1357-4

## 微光夜视系统在激光助视下的视距研究

狄慧鸽<sup>1,2</sup> 钱芸生<sup>2</sup> 赵爽<sup>3</sup>

1 郑州大学河南省激光与光电信息技术重点实验室, 郑州 450052  
2 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094  
3 西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049

**摘要:** 微光夜视仪的最大作用距离是它主要的技术指标和进行系统设计的主要依据。根据前人的研究, 系统总结了微光夜视系统的视距公式。为改变微光夜视系统易受外界影响的缺点, 一般需要再加入激光助视系统。加入激光助视系统之后光源的类型发生变化, 视距公式也会随之发生改变, 其中最主要的是光谱匹配系数的变化, 还有照度、对比度、反射率等都随之发生变化。详细分析了加入激光之后视距公式中各因子发生的变化, 为合理选择激光类型提供理论参考。并且估算了头盔式微光夜间驾驶仪(其中所用光电阴极为超二代管)在激光助视下的视距。验证了选取激光类型的合理性。

**关键词:** 激光光学; 微光夜视系统; 激光助视; 视距; 超二代管

中图分类号: TP802+.5; TN223 文献标识码: A

## Research for Visual Range of Low Light Level Imaging System Under the Laser Aids

Di Huige<sup>1,2</sup> Qian Yunsheng<sup>2</sup> Zhao Shuang<sup>3</sup>

1 HeNan Key Laboratory of Laser and Opto-Electric Information Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052  
2 School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094  
3 School of Electronic and Information Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049

**Abstract:** The maximal visual range of low light level (LLL) imaging apparatus is a basic guideline in system's design. Based on the early work, the visual range equation of LLL imaging system has been summarized. The laser aids system is used in order to improve its watching ability in bad weather. If so, there would be changed in the equation of visual range, especially the spectral matching factor. What's more, the illumination, contrast, reflectivity and so on would be changed. The changes about these factors after the adding of the laser are discussed, which can help choosing the lasers. The visual range of the super second generation image intensifiers under the laser aids is estimated, which proved the laser ( $\lambda=850\text{ nm}$ ) is reasonable.

**Key words:** laser optics; low light level imaging system; laser aids; visual range; super second generation image intensifier

### 1 引 言

对微光夜视系统视距的研究至今已有 60 多年的历史, 许多著名的专家学者都曾对微光成像系统的探测方程进行深入的理论分析和大量的实验研究。影响视距的因素很多, 经过前人的研究, 视距公式中的很多因素都被考虑到了, 已经形成了比较成熟的视距公式。微光夜视仪不需用人工照明, 靠夜天自然光照

明景物, 以被动方式工作, 自身的隐蔽性好。但易受外界影响, 图像平淡不分明。为变被动为主动, 使夜视仪能在极低的照度下也能观察目标, 加入了激光助视系统。当用激光助视时, 夜视仪接收的光由夜天光变为激光。由于光谱的变化会导致视距公式发生一系列的变化。本文分析了光谱变化时所引起的视距公式中的光谱匹配系数、照度、对比度以及反射率等

作者简介: 狄慧鸽(1981~), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事光电子信息技术与系统方面的研究。

E-mail: dihuige@zzu.edu.cn

收稿日期: 2004-09-16; 收到修改稿日期: 2005-04-11

的变化,这些为激光器的选择提供了依据。本文还估算了在全黑的情况下利用激光助视时,用超二代管观察人和车辆时所能达到的最大距离。

## 2 视距公式

影响视距的因素很多,自然条件、微光夜视系统、观察者都对视距的大小有很重要的影响。自然条件是无法改变的,观察者依靠好的视力和增加实际经验对视距的提高有很好的作用,然后就是微光夜视系统性能的提高对视距有着至关重要的作用。研究视距公式主要的目的就是将影响视距大小的各种因素综合起来,分析比较各种因素的影响。然后正确而合理地设计夜视仪,使夜天空的光谱与夜视仪的光电阴极更好的匹配,使人眼对系统性能的限制最大限度地减小,以使夜视仪性能达到最好。

微光夜间驾驶仪作为微光成像系统的一种,其视距一般是用微光成像系统的探测方程来计算的。根据经典微光成像理论研究,可得微光成像系统视距  $R_L(m)$  的理论公式<sup>[1]</sup>:

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

式中  $f'_0$  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,  $A_k$ <sup>[2]</sup> 为经过目标长宽比、大气透过率、对比度衰减、反射率及光谱匹配等一系列系数修正后微光夜视系统的空间分辨力。

$$A_k = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\Phi_{\min} f'_0} \times \left( \frac{S_\lambda \alpha_\lambda t \bar{\rho} E_0 \tau_0 \tau_d}{F_\Phi} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

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;  $M(A_k)$  为全系统对应空间频率为  $A_k$  时的调制传递函数(MTF)值;  $D$  为物镜的直径,  $\tau_0$  为物镜的透过率;  $\Phi_{\min}$  为人眼阈值信噪比,  $t$  为人眼的积累时间(s);  $S_\lambda$  对应的是光电阴极的积分灵敏度,  $\alpha_\lambda$  为光谱转换系数,  $F_\Phi$  为像增强器噪声功率因子;  $\epsilon$  为目标长宽比,  $\bar{\rho}$  为景物平均反射率,  $E_0$  为夜天空的照度(lx),  $\tau_d$  为大气透过率。这些参量的确定参见文献[2,3]。

## 3 有激光助视时的视距公式

激光助视下视距的理论估算与前面的计算公式是一致的,所不同的就是环境的照度可以更低( $10^{-4}$  lx 以下)以及  $A_k$  中的一些因子发生了变化。

由于辐射源由夜天光变成了激光,因此在  $A_k$  中

的  $C_0, \alpha_\lambda, \bar{\rho}, E_0$  等都随着发生了改变。其中最重要的就是光谱匹配系数的变化。由于激光助视后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  $S_\lambda$  是在室内用标准光源测得的。因此,在对微光夜视系统进行视距评估时,应把这个  $S_\lambda$  转化为对激光助视后的景物反射辐射的积分灵敏度  $S_\lambda$ 。

### 3.1 光谱匹配系数的变化

像增强器光电阴极的光谱响应与景物对激光波长反射辐射之间的光谱匹配是一个不容忽视的重要参量,它对微光夜视系统的视距评估起着重要作用。

光电器件在一定的光辐射作用下会产生信号输出,一般用器件灵敏度特性来表征其输出信号的强弱。灵敏度分光谱灵敏度和积分灵敏度。

光谱灵敏度是器件对单色入射辐射的响应能力,而积分灵敏度是指器件对全色入射辐射的响应能力,它们分别以  $S_\lambda$  和  $S$  表示。根据光电阴极的光谱响应特性曲线,可以得到光谱灵敏度  $S_\lambda$ , 将其对最大值  $S_m$  归一化,可得相对光谱灵敏度为

$$S(\lambda) = S_\lambda / S_m, \quad (3)$$

此时,光电阴极面接收的为夜天光和激光经过景物反射后的辐射,即

$$\omega_\lambda = \rho_\lambda P_\lambda + \rho_\lambda P_J, \quad (4)$$

式中  $\omega_\lambda$  为景物反射辐射光谱分布;  $\rho_\lambda$  为景物的光谱反射系数,它随波长变化;  $P_\lambda$  为夜天光辐射光谱分布,  $P_J$  为激光辐射光谱分布。

将景物的反射辐射光谱分布  $\omega_\lambda$  对其最大值  $\omega_m$  归一化,则得其相对光谱分布为

$$\omega(\lambda) = \omega_\lambda / \omega_m, \quad (5)$$

由此,定义光电阴极与景物反射辐射的光谱匹配系数:

$$\alpha[S, \omega(\lambda)] = \int S(\lambda) \omega(\lambda) d\lambda / \int \omega(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

该系数能有效地表征光电阴极的光谱响应与景物对激光的反射辐射光谱之间的匹配程度。 $\alpha[S, \omega(\lambda)]$  越大,则匹配越好,从而微光夜视系统的观测效果越好;  $\alpha[S, \omega(\lambda)]$  越小,则匹配越差,从而观测效果也越差。当  $S(\lambda)$  分布与  $\omega(\lambda)$  分布完全不重合时,  $\alpha[S, \omega(\lambda)]$  具有最小值 0; 在理想情况下,即在景物反射辐射光谱范围内  $S(\lambda)$  恒等于 1 时,  $\alpha[S, \omega(\lambda)]$  具有最大值 1。因此,对于有选择性的光电阴极来说,  $\alpha[S, \omega(\lambda)]$  是介于 0 与 1 之间的无量纲的系数。

### 3.2 相关参量的变化

参量  $E_0, C_0, C_d, \bar{\rho}, \alpha_\lambda$  都是与光谱分布有关,它

们发生变化是因为光谱由原来的夜天光变为夜天光和激光,所以在考虑时需要将激光一并考虑进去。

激光助视时的照度为景物反射夜天光的照度和

景物反射激光的照度,即  $E_0 = E_y + E_j$ 。其中  $E_y$  为景物反射的夜天光的照度,  $E_j$  为景物反射的激光照度。

目标与背景的初始对比度  $C_0$  定义如下:

$$C_0 = \left| \int S(\lambda)\omega(\lambda)\rho_{1\lambda}d\lambda - \int S(\lambda)\omega(\lambda)\rho_{2\lambda}d\lambda \right| / \left[ \int S(\lambda)\omega(\lambda)\rho_{1\lambda}d\lambda + \int S(\lambda)\omega(\lambda)\rho_{2\lambda}d\lambda \right], \quad (7)$$

其中  $S(\lambda)$  为光电阴极的相对光谱响应,  $\omega(\lambda)$  为辐射源的相对辐射通量,包括夜天光和激光。  $\rho_{1\lambda}$  和  $\rho_{2\lambda}$  分别为目标和背景的光谱反射系数,  $\lambda$  为波长。这个参量的变化主要是由于辐射源的变化而引起的相对辐射通量的变化。

大气对比衰减系数  $C_d$  定义如下:

$$C_d = \frac{1}{1 + K_A(1/\tau_d - 1)}, \quad (8)$$

其中  $\tau_d$  为大气透过率,  $K_A = L_A/L_{ave}$  为天空景物亮度比,  $L_A$  为天空亮度,  $L_{ave}$  为目标与背景的平均亮度;引起大气对比衰减系数变化是因为大气透过率和天空景物亮度比的变化。

目标和背景对应的平均反射率为

$$\begin{cases} \bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2, \\ \rho_1 = \int \omega(\lambda)\rho_{1\lambda}d\lambda / \int \omega(\lambda)d\lambda, \\ \rho_2 = \int \omega(\lambda)\rho_{2\lambda}d\lambda / \int \omega(\lambda)d\lambda, \end{cases} \quad (9)$$

$\rho_1$  为目标积分反射率;  $\rho_2$  为背景积分反射率;反射率的变化也是由于相对辐射通量发生了变化。

光谱转换系数为  $\alpha_\lambda$ :

$$\alpha_\lambda = \frac{\bar{\alpha}(S,t) \cdot \alpha(e,A)}{\alpha(S,A) \cdot \bar{\alpha}(e,t)}, \quad (10)$$

$\alpha(S,A)$  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;  $\bar{\alpha}(S,t)$  为光电阴极与景物的光谱匹配系数;  $\bar{\alpha}(e,t)$  为光适应眼与景物的光谱匹配系数。它们的具体计算方法参见文献[3]。

## 4 实 例

在头盔式激光助视/微光夜间驾驶仪系统中,使用激光助视是为了变被动为主动,当天气全黑或雾雨天时可以用激光增强观测效果。系统要求在全黑情况下,激光助视时,目标为人时可以达到 100 m,目标为车时可以达到 150 m。下面由理论计算值来验证选取激光光源的合理性。

选取激光波长为 850 nm,这一方面是因为头盔中一般选用超二代管(光电阴极为 Super S25 或

New S25)<sup>[2,4]</sup>,此波长能与光电阴极较好地匹配;另一方面是照顾到光源的隐蔽性,以免被敌人发现。

下面确定视距公式中的各个参量:

由于目标和背景的多样性,视距估算时,我们只选取特定的目标和背景,选取目标为人和车,背景为透空和绿色草木。

### 1) 系统参量的确定

物镜直径  $D=18$  mm,物镜焦距  $f'_0=26$  mm,对于优质光学系统,通常取物镜透过率  $\tau_0=0.8$ 。光电阴极的积分灵敏度  $S_A=500$   $\mu\text{A}/\text{lm}$ 。由于通道噪音的存在<sup>[7,8]</sup>,使得噪声功率因子  $F$  总大于 1。希望  $F$  越小越好,像增强器噪声功率因子一般在 1~4 之间,这里取  $F_\Phi=2$ 。系统中用的像增强器的类型为超二代管,它的典型亮度增益值为  $G=22000$ <sup>[6]</sup>。

### 2) 人眼和目标参量的确定

取人眼阈值信噪比  $\Phi_{\min}=2$ ,人眼积累时间  $t=0.2$  s。目标尺寸  $H_t=0.5$  m(对人而言,为人肩宽)和 2 m(对车辆而言,为车高)。空间频率  $N_e=4$ (对人),  $N_e=6$ (对车辆)。目标长宽比  $\epsilon=28$ (对人),  $\epsilon=24$ (对车)。

### 3) 与激光光谱有关的参量确定

参照文献[3]所介绍的方法,并且在计算参量时考虑到激光对总光谱分布的影响,可得到各个参数值如表 1。

表 1 不同背景和目标情况下与激光光谱有关的参数值  
Table 1 Factors related to laser spectrum under different backgrounds and targets

Factors	Transparent		Green Vegetation	
	Man	Car	Man	Car
$C_0$	0.5337	0.8416	0.3476	0.7591
$C_d$	0.9	0.9	0.9	0.9
$\bar{\rho}$	0.652	0.543	0.466	0.357
$\alpha(S,A)$	0.4117	0.4117	0.4117	0.4117
$\alpha(e,A)$	0.0421	0.0421	0.0421	0.0421
$\bar{\alpha}(S,t)$	0.83	0.83	0.83	0.83
$\bar{\alpha}(e,t)$	0.0165	0.0246	0.00773	0.0158
$\alpha_\lambda$	5.14	3.45	10.98	5.37

考虑到头盔使用激光助视是在夜天光很微弱的情况下,所以在计算光谱匹配系数时忽略掉了夜

天光。

下面来计算照度：

所选择的激光管的最大输出功率为 50 mW。

对头盔式夜间驾驶仪一般要求在使用时能看清前方一定区域的路面(10 m 宽、2 m 远)，所以需要一定的装置<sup>[5]</sup>对半导体激光器发出的光束进行调整，调整后激光的发散角为  $10^\circ \times 2^\circ$ 。激光传输  $R$  距离后的光斑大小为： $S = 0.0048R^2$ 。物体接收的照度为

$$E_0 = P \times \tau / S = \frac{50 \exp(-0.3431 \times 10^{-3} \times R) \times 10^{-3}}{0.0048 \times R^2}, \quad (11)$$

由于视距计算的复杂性和照度的不确定性，在计算照度时用交叉法。

在几个特殊距离处的照度如表 2 所示。

表 2 不同距离处的激光(850 nm)照度值

Table 2 Illumination of laser (850 nm) with different visual ranges

Visual range /m	Illumination /lx
10	0.1038
50	0.0041
100	0.001
150	0.00044
200	0.000243

根据项目的要求选取距离为 100 m 处的照度  $E_0 = 0.001 \text{ lx}$ ，将照度值代入视距公式中，可以得出发现人的视距与系统分辨力  $A_k$  如表 3 所示。

表 3 人的发现距离和系统分辨力

Table 3 Visual range and distinguishing ability of man

Transparent		Green Vegetation	
Visual range /m	Distinguishing ability /mm <sup>-1</sup>	Visual range /m	Distinguishing ability /mm <sup>-1</sup>
98	30	91	27.9

由表 3 可以看出，视距值基本符合要求，那么照度的选取也是合理的。

计算车的视距时，先选取距离为 150 m 处的照度，计算出的视距为 230 m 和 223 m，相差太大，所以说选取的照度不合理。应该选 200 m 处的照度  $E_0 = 0.000243 \text{ lx}$ ，得出的视距如表 4 所示。

表 4 车的发现距离和系统分辨力

Table 4 Visual range and distinguishing ability of car

Transparent		Green Vegetation	
Visual range /m	Distinguishing ability /mm <sup>-1</sup>	Visual range /m	Distinguishing ability /mm <sup>-1</sup>
201	23.2	194	22.4

由表 4 可以看出视距值为 200 m 左右，所以说选取的照度是合理的。

## 5 结 论

通过上面的分析和计算可以看出，由于激光助视时像增强器光电阴极接收的光谱的变化导致了夜视仪的视距公式中的一些因子也发生了变化，特别是光谱匹配系数的变化。所以在激光助视时，激光波长的选择是很重要的。光谱匹配系数的大小直接影响到观察距离的远近，所以要根据所用的光电阴极类型来合理地选择激光器。同时还要考虑到隐蔽性问题，以免被敌人发现目标。照度的大小也影响视距，所以选择激光器时还要同时考虑功率问题，这个需要根据系统的要求来具体确定。本文所选用的激光波长达到了系统设计的要求，选择是合理的。

## 参 考 文 献

- Li Wei. Visual range evaluation of low light level night vision system and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2001. 88~90 (in Chinese)  
李 蔚. 微光夜视系统视距评估及其应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2001. 88~90
- Liu Lei, Chang Benkang, Li wei. Visual range of lowlight level night vision goggles for drivers[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, **24**(3): 342~345 (in Chinese)  
刘 磊, 常本康, 李 蔚. 微光夜间驾驶仪探测距离研究[J]. 兵工学报, 2003, **24**(3): 342~345
- 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 (in Chinese)  
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. A study on spectral response characterization of super S<sub>25</sub> photocathodes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 613~617 (in Chinese)  
刘 磊, 常本康. Super S<sub>25</sub> 与 New S<sub>25</sub> 光电阴极的光谱响应特性的数值模拟[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 613~617
- Hao Peiming, Wang Peng, Wang Zhanshan *et al.*. Lens design for high power and wide-aperture beam expander[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(6): 494~496 (in Chinese)  
郝沛明, 王 鹏, 王战山 等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 494~496
- Di Huige, Zhao Shuang, Qian Yunsheng *et al.*. The affect of luminance gain to visual range of LLL night vision apparatus[J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(6): 27~30 (in Chinese)  
狄慧鸽, 赵 爽, 钱芸生 等. 亮度增益对夜视仪视距的影响[J]. 红外技术, 2004, **26**(6): 27~30
- Qian Yunsheng, Chang Benkang, Tong Moying *et al.*. Frequency spectrum measurement of noise of image intensifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 67~70 (in Chinese)  
钱芸生, 常本康, 童墨颖 等. 像增强器噪声频谱特性测试技术研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 67~70
- Zheng Zheng. Experimental studies on the impact of ASE noise of single-channel optical amplifiers in central office applications[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6): 311~313