

# 微光夜视仪探测距离的计算

吴 宝 业

(昆明物理研究所)

**摘要**——本文从应用观点出发,阐述了计算微光夜视仪探测距离的新方法,给出了计算公式和计算实例,可用于微光夜视仪的总体设计及性能评价。

## 一、前 言

微光夜视仪的探测距离是一个十分重要的综合性参数,影响探测距离的因素既多又十分复杂,涉及到目标状态、大气条件、天空光度、夜视仪中象增强器等元器件的性能参数、及人眼的视觉特性等等。本文从应用的观点出发,提出了新的计算方法,为便于叙述起见,本文先阐明一些基本参数的概念及计算,然后综述探测距离的计算公式及计算实例。

## 二、景物亮度、背景亮度和噪声亮度

设景物和背景的固有亮度为  $L_{t0}$  和  $L_{b0}$ , 且  $L_{t0} > L_{b0}$  (对于  $L_{b0} > L_{t0}$  的情况, 计算时将  $L_{b0}$  作为景物亮度,  $L_{t0}$  作为是背景亮度), 天空亮度为  $L_q$ , 一公里路程上的大气透过率为  $\tau_a$ , 在离景物距离  $R$  处用肉眼观察到的景物亮度为  $L_{tR}^{[1]}$ , 则有

$$L_{tR} = \tau_a^R L_{t0} + L_q(1 - \tau_a^R) = \tau_a^R (L_{t0} + L_d), \quad (1)$$

其中

$$L_d = L_q(1 - \tau_a^R) / \tau_a^R = E_q(1 - \tau_a^R) / (\pi \tau_a^R). \quad (2)$$

这里,  $E_q$  是测得的天空照度 (lux),  $L_q(1 - \tau_a^R)$  是含包在路程  $R$  之内的“大气辐射亮度”(通常称为外噪声),  $L_d$  是外噪声折算在景物处的亮度。另外, 夜视仪中的象增强器还存在着由于热发射等引起的内噪声。设象增强器的等效背景照度为  $E_h$  (lux), 物镜的相对孔径为  $\frac{D}{f_{ob}}$ , 透过率为  $\tau_{ob}$ , 内噪声折算在景物处的亮度为  $L_h$  (nit), 则有

$$L_h = 4E_h / \left( \pi \left( \frac{D}{f_{ob}} \right)^2 \tau_a^R \tau_{ob} \right). \quad (3)$$

令  $L_{ah}$  为噪声亮度, 并且

$$L_{ah} = L_d + L_h \text{ (nit)}. \quad (4)$$

如果将  $L_{ah}$  考虑在内, 可得:

---

本文 1984 年 8 月 14 日收到。

$$\left. \begin{array}{l} \text{景物等效亮度 } L'_{t_0} = L_{t_0} + L_{ah}(\text{nit}), \\ \text{背景等效亮度 } L'_{b_0} = L_{b_0} + L_{ah}(\text{nit}). \end{array} \right\} \quad (5)$$

这样,呈在光阴极面上的相应照度为

$$\left. \begin{array}{l} E_t = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f_{ob}} \right)^2 \tau_a^R \tau_{ob} L'_{t_0} \quad (\text{lux}), \\ E_b = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f_{ob}} \right)^2 \tau_a^R \tau_{ob} L'_{b_0} \quad (\text{lux}). \end{array} \right\} \quad (6)$$

### 三、景物的空间频率及信息系数

景物的空间频率是景物单位长度所具有的空间周数(或称空间线对数),用  $R_f$  表示,单位为 lp/mm。  $R_f$  的值表征辨别景物细节的清晰度。任何一个被观察的景物都能被简化为平面图形,这种平面图形还可以根据观察细节的不同要求划分为  $m$  个区域。设图形的总面积为  $S_t$ , 每个区域的面积分别为  $S_1, S_2, \dots, S_m$ , 显然,有  $S_t = \sum_{i=1}^m S_i$ 。而相应于每个区域内根据观察要求所确定的空间周数分别为  $N_1, N_2, \dots, N_m$ , 那么,景物的空间频率应为

$$R_f = \frac{1}{l} \left( N_1 \frac{S_1}{S_t} + N_2 \frac{S_2}{S_t} + \dots + N_m \frac{S_m}{S_t} \right) = \frac{1}{l S_t} \sum_{i=1}^m N_i S_i, \quad (7)$$

式中  $l$  是景物平面图形某边的边长(m);  $N_i$  是  $i$  区域的空间周数(lp), 取值决定于观察要求,可按表 1 选取。

表 1 空间周数(lp)  
Table 1 Spatial frequency

观察要求 采用标准	发现景物	识别景物	看清景物
J. Johnson 方法	1	4	8
西德国防技术年鉴	2~4	6~8	10~12

另外一个值得注意的问题是: 景物的空间频率仅体现了景物细节被分辨的程度, 并没有反映出景物所具有的信息量的多少。譬如, 有两个景物, 其空间频率可能相同, 但两个景物的大小可能完全不同, 即所含有的信息量不相等, 而信息量的差异反映在每一个象素(即线条)上。为了表征景物的信息量, 我们定义一个象素的等效高度与线条的宽度之比为信息系数  $y$ , 则有:

$$y = \left( \frac{S_t}{l} \right) / \left( \frac{1}{2R_f} \right) = \frac{2}{l} R_f S_t = \frac{2}{l^2} \sum_{i=1}^m N_i S_i. \quad (8)$$

### 四、景物图象的对比度

此对比度涉及的不仅是能量, 更主要的是能量分布。最好的系统不应该使景物图象的能量分布发生变化, 事实上, 由于种种原因, 这是不可能做到的。

设景物的固有对比度为  $C_0 = (L_{t0} - L_{b0}) / (L_{t0} + L_{b0})$ , 那么, 由于噪声亮度  $L_{dn}$  的影响, 使得光阴极上景物图象的能量分布变坏, 这时的对比度为  $C_o$  与  $C_p$  的乘积,  $C_p$  是噪声对比传递系数, 并且

$$C_p = \left(1 + \frac{2L_{dn}}{L_{t0} + L_{b0}}\right)^{-1}. \quad (9)$$

图象经过象增强器的传递在荧光屏上显示, 使得荧光屏上的该景物图象的对比度再次变坏。这是由于图象的象元之间发生了能量的相互扩张、相互渗透, 并且, 传递空间频率愈高, 扩张和渗透就愈显著。象增强器的对比传递系数可表达为<sup>[2]</sup>:

$$C_i = \frac{8}{\pi^2} \left[ M(f) + \frac{1}{3^2} M(3f) + \frac{1}{5^2} M(5f) + \dots \right] \doteq \frac{8}{\pi^2} M(f), \quad (10)$$

式中  $f$  是图象的空间频率 (lp/mm);  $M(f)$  是象增强器在空间频率为  $f$  时的调制传递函数, 可近似表达为:

$$M(f) \doteq \exp \left[ - \left( \frac{R \cdot R_f}{f_c \cdot f_{ob}} \sqrt{\frac{\pi \eta''}{2y}} \right)^n \right], \quad (11)$$

式中  $f_c$  是空间频率常数 ( $M(f) = e^{-1}$  时的频率值);  $n$  是器件指数, 其值一般在 1.1 至 2.1 之间;  $f_{ob}$  是光学物镜的焦距 (mm);  $\eta''$  是考虑景物形状对视觉功能影响的系数, 其值依试验情况而定。

这样, 在象增强器荧光屏上所呈现的景物图象的对比度就是:

$$C = C_o \cdot C_p \cdot C_i. \quad (12)$$

设目镜仅有透过损失, 人眼通过目镜去观察荧光屏上的景物图象, 其对比度自然也是  $C$ 。

## 五、象增强器的等效分辨率

分辨率是象增强器的一个重要参数, 在高光度工作环境中, 象增强器的性能主要受  $M(f)$  限制, 这时象管的极限分辨率对应于象管  $M(f)$  曲线约 3% 处的空间频率值。而在低光度环境中 (夜视仪基本上是在这种条件下工作的), 象管的性能主要受量子噪声限制, 而象增强器的量子噪声主要是由第一个光阴极的光电子涨落形成<sup>[3,4]</sup>。从而可推导出在低光度条件下象增强器的等效分辨率, 我们简称为低光等效分辨率, 用  $\delta_o$  代表, 其值为

$$\delta_o = \frac{kC}{(f/n_o)N_f} \sqrt{\frac{K_m \tau_a^R \tau_{ob} S t L_{t0}}{1+C}} \quad (\text{lp/mm}), \quad (13)$$

式中  $(f/n_o)$ 、 $\tau_{ob}$  分别为物镜的  $F$  数及透过率;  $S$  是光阴极的积分灵敏度 ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ );  $N_f$  是象增强器的噪声系数, 它的平方值就是通常称为象管噪声因子的值, 目前一代单级管的  $N_f$  值约为 1.2, 三级串联管的  $N_f$  值约为 1.5, 二代管一般为 2 左右<sup>[8]</sup>。 $k$  是一常数, 根据实验室测试象管所用分辨率板上线条的高宽比和此时的阈值信噪比  $K$  而定, 根据 L. P. Csorba 的测试结果<sup>[6,7]</sup>, 在高宽比为 5:1、 $K = 3.1$  时, 算得  $k = 283.25866 \doteq 283$ 。 $K_m$  是光谱匹配系数, 且  $K_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_\lambda S_\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r_\lambda d\lambda$ , 这里,  $r_\lambda$  是天空光谱的相对辐射能,  $S_\lambda$  是光阴极的相对光谱灵敏度, 典型的  $K_m$  计算值如表 2。

$t$  是人眼的积分周期, 在低光度下取  $t$  值为 0.2 s。其余参数 (如  $C$ 、 $\tau_a^R$ 、 $L_{t0}$ ) 的含义同前。

表 2 典型的  $K_m$  计算值  
Table 2 Typical calculated values of  $K_m$

光 度 \ 光阴极	$S_{20}$	$S_{20R}$	$S_{25}$
满 月 光	0.86	0.9	0.94
晴 朗 星 光	0.81	0.87	0.92

设  $\delta_i$  为象增强器的极限分辨率, 那么, 在任何光度及任何对比度的情况下, 象增强器的整管等效分辨率  $\delta_w$  的一级近似为

$$\delta_w \doteq \delta_c \cdot \delta_i / \sqrt{\delta_c^2 + \delta_i^2}; \quad (14)$$

显然, 在高光度下,  $\delta_c$  很大, 分母中可略去  $\delta_i^2$ , 故有  $\delta_w \doteq \delta_i$ ; 反之, 在低光度下,  $\delta_c$  很小, 则有  $\delta_w \doteq \delta_c$ 。

## 六、人眼的视觉特性

人的眼睛所以能看到景物是因为视网膜敏感元接受了来自景物的光辐射, 并将其传递给大脑神经。前人的许多研究和测试宏观地证实了用裸眼去观察景物时, 人眼的视觉特性与所观察的景物亮度、对比度及景物对人眼的张角这三要素是密切相关的。而人眼通过夜视仪的目镜去观察荧光屏上的景物象时, 视觉特性仍满足裸眼观察时的类似关系。设人眼通过目镜观察屏幕上一个线对所需的视角  $\alpha_n$  (分) 与荧光屏上景物图象的等效平均亮度  $B$  (nit) 和对比度  $C$  的关系可近似表示为:

$$\alpha_n = \frac{0.17C^{0.2} + 0.0002(\tau_e B)^{-\frac{1}{2}} + 0.028(\tau_e B)^{\frac{1}{1.7}}}{C \sqrt{\tau_e B}} + \alpha_{\min}, \quad (15)$$

式中  $\alpha_{\min}$  是人眼通过目镜观察象管荧光屏时, 光度及对比度为最佳状态的极限分辨角,

$$\alpha_{\min} = [(3438M/f_e \delta_i)^{1.25} + 1]^{\frac{1}{1.25}}. \quad [16]$$

$\tau_e$  及  $f_e$  分别是目镜的透过率及焦距(mm),  $M$  是象增强器电子光学系统的线倍率。

必须注意的是,  $B$  是景物图象的等效平均亮度, 对于无自动增益控制的象增强器, 其  $B$  值为

$$B = GE_0 / (\pi N_f^2) \quad (\text{nit}), \quad (17)$$

式中  $E_0 = \frac{1}{2}(E_t + E_b)$  ( $E_t$  及  $E_b$  按式(16)计算),  $G$  是亮度增益(asb/lux)。对于有自动亮度控制(ABO)的象增强器,  $B$  的取值按三步确定: (1) 按式(6)算出  $E_0$ , 然后根据所用象增强器的  $B-E_0$  关系曲线, 查出相应于  $E_0$  的  $B$  值; (2) 如果查出的  $B$  值位于  $B-E_0$  曲线的斜线部分(即亮度不受控制部分), 用式(17)算出的  $B$  值即为图象的等效亮度; (3) 如果查出的  $B$  值位于  $B-E_0$  曲线的水平线部分(即亮度受控制部分), 那么应将查出的  $B$  与用式(17)算得的  $B$  值比较, 取较小值。

当  $\tau_e$  和  $\alpha_{\min}$  均取为 1, 则式(15)就是裸眼观察景物时视觉三要素的关系式。

## 七、微光夜视仪探测距离方程式

使用夜视仪观察景物,实际上是景物的信息通过物镜、象增强器、目镜传递给人眼的过程。在这一过程中,应注意在象增强器荧光屏上呈现的景物图象是实象,在二维空间,系统的探测距离  $R$  应该满足不等式:

$$\frac{y}{2R^2 R_f^2} \geq \frac{\pi \eta''}{4f_{ob}^2 \delta_w^2} \geq \frac{\pi \eta''}{4\Gamma^2} \left( \frac{\eta' \alpha_n}{3438} \right)^2, \quad (18)$$

式中  $\Gamma$  是夜视仪的角倍率,且  $\Gamma = f_{ob} M / f_e$ ;  $\eta'$  是考虑人眼在实际观察中连续工作时为减轻观察者疲劳所取的系数,一般取  $\eta' = 2 \sim 3$ 。利用式(18)求解  $R$ ,为计算方便,可将式(18)第一、二项和第一、三项分别联合立求解,得到探测距离  $R_1$  及  $R_2$ ,则系统的探测距离就是  $R_1$  及  $R_2$  中的较小值。具体步骤如下:

$$R_1 \leq \frac{f_{ob} \delta_w}{R_f} \sqrt{\frac{2y}{\pi \eta''}} = \frac{f_{ob} \delta_o \delta_l}{R_f} \sqrt{\frac{2y}{(\delta_c^2 + \delta_i^2) \pi \eta''}}, \quad (19a)$$

$$R_2 \leq \frac{3438 \Gamma}{R_f \eta' \alpha_n} \sqrt{\frac{2y}{\pi \eta''}}, \quad (19b)$$

$$R = \min(R_1, R_2)。 \quad (19c)$$

式(19)即是微光夜视仪的探测距离方程式,  $R$  值是系统的探测距离,式中的其它参数根据前面的有关公式计算。

若在计算结果中出现  $R_1 > R_2$  情况,表明由于人眼视觉特性的限制,使得夜视仪的探测距离只达到  $R = R_2$  的值,这时可以通过增大目镜的倍率或提高象管的亮度增益等手段来改善探测性能。反之,如果出现  $R_1 < R_2$  的情况,表明由于量子噪声的限制,夜视仪的探测距离为  $R = R_1$ ,这时可以通过增大物镜孔径、提高象管的光阴极灵敏度、降低噪声系数等手段来改善仪器的性能。当出现  $R = R_1 = R_2$  时,则说明夜视仪在使用条件下充分发挥了作用,从总体角度评价,可以认为夜视仪的性能达到了最佳水平。

求解式(19a)和式(19b)时,由于  $R_1$  及  $R_2$  都是隐函数,只能用优选法反复迭代计算逼近求解,使邻近二次计算结果之差满足所要求的误差  $\epsilon$  即可。譬如求解式(19a),首先根据使用的夜视仪及其它条件确定已知参数,然后任意假定一探测距离  $R'_1$ ,将其代入式(19a)右项算得  $R''_1$ ,检验是否满足  $|R''_1 - R'_1| < \epsilon$  条件(一般取  $\epsilon = 0.2 \sim 0.5$  m),若满足这一条件,则得  $R_1 = R'_1$ ,否则再计算  $(R''_1 - R'_1) \times 0.618 + R'_1$  值并代替原来的  $R'_1$  值,再代入(19a)右项计算,如此反复进行,直到结果满足误差条件为止。用同样的方法求解式(19b)中的  $R_2$ ,最后利用式(19c)获得系统的探测距离  $R$ 。

该计算方法已编成 Ti-59 计算器程序。

## 八、计算实例

我们用一台微光夜视仪,在夜间观察一个站立的穿蓝色工作服的人。观察场地是一片开阔地,目标的后面是长满草及少数树木的土墙。天空晴朗、无月、有星及少量云,测得天空侧向目标的照度值随着观察时间的推移从  $3.6 \times 10^{-3}$  lux 变为  $1.5 \times 10^{-3}$  lux。

夜视仪的性能:

(1) 光学系统: 物镜焦距  $f_{ob}=90\text{ mm}$ , 透过率  $\tau_{ob}=0.8$ , 相对孔径  $D/f_{ob}=1/1$ , 目镜焦距  $f_e=12.57\text{ mm}$ , 透过率  $\tau_e=0.75$ 。

(2) 象增强器: 使用缩小倍率的一代单级管, 光阴极灵敏度  $s=322\ \mu\text{A}/\text{lm}$ , 极限分辨率  $\delta_l=37\text{ lp/mm}$ , 放大率  $M=0.29$ , 亮度增益  $G=2716$ , 等效背景照度  $E_b=10^{-7}\text{ lux}$ , 从测得的调制传递函数可推出空间频率常数  $f_c=14.5\text{ lp/mm}$ , 器件指数  $n=1.5$ , 噪声系数  $N_f$  取为 1.2。

景物参数: 设人高 1.7 m, 宽 0.5 m。要求识别此人时取空间周数  $N=4\text{ lp}$ , 则  $R_f=\frac{4}{1.7}=2.353\text{ lp/m}$ ,  $y=2R_f\frac{S_t}{l}=2\times\frac{4}{1.7}\times\frac{1.7\times 0.5}{1.7}=2.353$  (或者用  $R_f=\frac{4}{0.5}=8\text{ lp/m}$ ,  $y=27.2$  均可), 蓝色工作服的反射率为 0.2, 背景草地的反射率为 0.55。

大气条件: 设大气一公里透过率  $\tau_a=0.6$ , 光谱匹配系数为  $K_m=0.92$ 。

其它参数: 取  $\eta'=3$ ,  $\eta''=1.2$ ,  $\varepsilon=0.2\text{ m}$ 。算得夜视仪的角倍率  $\Gamma=2.076$ ,  $\alpha_{\min}=2.7826'$ ,  $C_0=0.466667$ 。

计算结果如下(取三个照度值):

(1)  $E_q=9\times 10^{-4}\text{ lux}$  时, 算得  $R_1=198\text{ m}$ ,  $R_2=199\text{ m}$ , 所以系统的探测距离  $R=198\text{ m}$ 。

(2)  $E_q=1.5\times 10^{-3}\text{ lux}$  时, 算得  $R_1=235\text{ m}$ ,  $R_2=220\text{ m}$ , 所以  $R=220\text{ m}$ 。

(3)  $E_q=2.55\times 10^{-3}\text{ lux}$  时, 算得  $R_1=277\text{ m}$ ,  $R_2=242\text{ m}$ , 所以  $R=242\text{ m}$ 。

这些计算结果与试验结果基本吻合。

## 参 考 文 献

- [1] Bailey H. H and Mundie L. G., **AD685704**, 1969.
- [2] 王述炎译, 红外技术, **5** (1983), 3:8.
- [3] Csorba L. P., *RCA Review*, **30** (1969), 1:3.
- [4] Csorba L. P., *RCA Review*, **32** (1971), 2: 297.
- [5] Csorba L. P., *Applied Optics*, **18** (1979), 14: 2440.
- [6] 崔玉林译, 红外技术, **5**(1983), 3:16.

## CALCULATION OF DETECTION DISTANCE OF A PASSIVE NIGHT VISION SYSTEM

WU BAoye

(Kunming Institute of Physics)

### ABSTRACT

A new method for calculating detection distance of a passive night vision system is described from the application viewpoint. A calculative formula and a practical example are presented. This method can be used either for designing a new system or for estimating performances of an old one.