

〈微光技术〉

微光夜视仪分辨力计算方程的修正

张竹平, 李 力, 贾星蕊, 陈洪明, 刘春梅, 覃金生, 姜艳凤

(北方夜视科技集团有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 分析了微光夜视仪典型分辨力计算方程存在的缺陷, 从参数单位取值、噪声功率因子、大气透过率、系统传函与空间频率的匹配等方面对该方程进行了修正, 建立了更为完善和实用的分辨力计算方程。结合某通用微光夜视仪进行了分辨力估算, 验证了经修正后的分辨力公式的实用性, 对微光夜视仪分辨力计算有较好的指导意义。

关键词: 微光夜视仪; 分辨力; 计算方程; 修正

中图分类号: TN223

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2014)11-0930-04

Correction on Resolution Calculation Formula for Low Light Level Night Vision Device

ZHANG Zhu-ping, LI Li, JIA Xing-rui, CHEN Hong-ming, LIU Chun-mei, QIN Jin-sheng, JIANG Yan-feng
(North Night Vision Science and Technology Group Co. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: Defects in typical resolution calculation formula for low light level night vision device are analyzed in this paper. Correction is carried out in parameter value, noise power factor, atmosphere transmissivity, adaption of transfer function and spatial frequency of system. A more completed and available resolution calculation function is put forward. The corrected resolution calculation formula has been validated by estimating resolution of low light level night vision device and it may play a guiding role in resolution calculation of low light level night vision device.

Key words: low light level night vision device, resolution, calculation function, correction

0 引言

微光夜视仪是研究在夜间低照度的情况下, 利用光增强技术扩展人眼在微弱光下的视觉能力, 实现夜间隐蔽观察的光电成像系统。夜视仪可以在极低照度下完全“被动”式工作, 是一个从光电到电光的二次转换的综合光电系统。微光夜视仪性能评价中视距和分辨力是两个反映其综合性能的关键指标。在视距计算上, 从阈值探测理论、视距理论模型、最大作用距离、探测距离等方面对视距探测方程都有很多研究^[1-7]。但视距受环境因素及大气因素影响较大, 环境照度, 目标特性, 环境特性的改变将直接影响视距, 实际使用环境中, 照度、对比度条件与设计要求不可避免会存在误差, 使视距存在较大偏差。因此, 在微光夜视仪性能评估中野外观

察——视距仅作参考。

在夜视仪生产中都以实验室(暗室)分辨力检测为准, 实验室中照度、目标与背景特性具有确定性, 此外, 实验室条件下还可进行微光环境模拟^[8], 分辨力检测结果具有确定性。

经典的分辨力计算方程, 参数中存在非标准单位取值, 噪声功率因子是基于二代像增强器基础上的计算, 系统传函中空间频率按经验取值, 存在不确定因素等缺陷, 计算结果存在较大偏差, 必须对分辨力计算方程进行修正。

本文在经典的分辨力计算方程基础上, 从物镜有效口径、灵敏度单位取值、噪声功率因子、大气透过率、系统传函与空间频率的匹配等诸多方面进行修正, 建立更为实用和完善的分辨力计算方程, 并结合某通用微光夜视仪进行了分辨力估算, 验证

了经修正后的分辨率公式的实用性, 对微光夜视仪分辨率计算有较好的指导意义。

1 经典分辨率计算方程

按像增强器输出端闪烁信噪比计算的经典分辨率计算方程为:

$$\alpha = \frac{2k}{MCD} \cdot \sqrt{\frac{2e \cdot f}{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot t \cdot \tau \cdot \tau_d}} \quad (1)$$

式中: k 为阀值信噪比; C 为目标与背景对比度; M 为系统 MTF, $M=M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$; D 为物镜有效孔径, m ; e 为电子电荷数, $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; f 为像增强器的噪声功率因子: $f = 0.1266 \frac{S}{(\text{S/N})^2}$; $\rho_1 + \rho_2$ 为目标背景反射率之和; E 为环境照度; S 为光电阴极的积分灵敏度, A/lm ; τ 为物镜的透过率; t 为人眼的积累时间, 取 0.2 s ; τ_d 为大气透过率, $\tau_d = e^{-RL}$, 该式中, R 为大气的透过系数, 晴朗大气 $R=0.1665$, L 为目标距离, km 。

式(1)中, 物镜有效孔径 D 单位为 m , 光电阴极的积分灵敏度 S 单位为 A/lm , 与标准单位不一致, 噪声功率因子是基于二代像增强器基础上的计算, 对于 1XZ18/18 超二代信噪比测试条件不同, 不能直接采用信噪比数据, 需转换到二代测试照度下的等效信噪比数值。系统传函中空间频率按经验取值, 存在不确定因素等缺陷; 分辨力没有与焦距发生关系, 计算结果视空间频率取值不同存在偏差。有必要对分辨率计算方程进行修正, 以方便进行准确的分辨率评估。

2 分辨力理论公式的修正与补充

2.1 参数单位的标准化

物镜有效孔径 D , 按标准单位统一为 mm , 光电阴极的积分灵敏度 S 按标准单位统一为 $\mu\text{A/lm}$, 原分辨率 α 计算结果为 rad , 按标准单位统一为 mrad , 按此取值后计算方程修正为:

$$\alpha = \frac{2k}{MCD} \cdot \sqrt{\frac{2e \cdot f}{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot t \cdot \tau \cdot \tau_d}} \times 10^9 \quad (2)$$

原计算方程中系统 MTF, $M=M_1 M_2 M_3$, 式中 M_1 、 M_2 、 M_3 分别为物镜、像增强器、目镜的 MTF。系统传函中空间频率按经验取值, 如在 $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 条件下通常取 10 lp/mm 。代入 10 lp/mm 时 M_1 、 M_2 、 M_3 值进行计算。计算结果因空间频率取值的不同存在差异; 计算方程没有与焦距发生关系。

引入以下公式进行约束:

$$N_K = \frac{1000}{\alpha \cdot f'} \quad (3)$$

式中: N_K 为系统空间频率, lp/mm ; α 为整机分辨率, mrad ; f' 为物镜焦距, mm 。

将(2)代入(3)中:

$$N_K = M \cdot \frac{C \cdot D}{2k \cdot f'} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot \tau \cdot t \cdot e^{-RL}}{2ef}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

公式(4)为 N - M 函数, 通过系统 MTF 曲线与 N - M 函数求出特定的 N_K 值 (如图 1) 和 M 值, 从而可得到唯一的分辨率值。

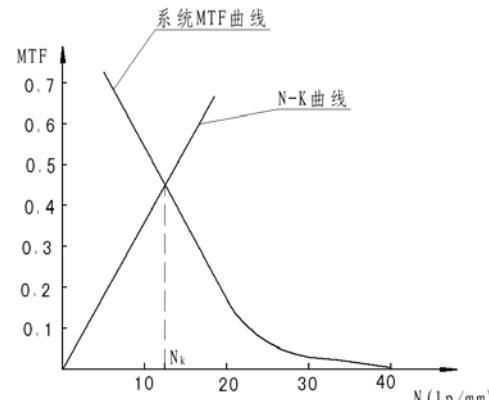


图 1 系统空间频率求解

Fig.1 Schematic drawing of continuous zoom optical system

还可通过不断插值计算 M 、 N_K , 直致使 M 、 N_K 值与系统传函和系统空间频率相一致。

2.2 目标与背景对比度

在夜天光照射下; 在规定照度照射时, 反射式成像的目标靶, 对比度可由下式定义^[9]:

$$C = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad (5)$$

式中: ρ_1 为白背景反射比; ρ_2 为暗目标的反射比。当 $\rho_1=0.9$, $\rho_2=0.44$, 即 $\rho_1+\rho_2=1.34$ 时, $C=0.343$; 当 $\rho_1=0.9$, $\rho_2=0.08$, 即 $\rho_1+\rho_2=0.98$ 时, $C=0.837$ 。

2.3 大气透过率

大气衰减是辐射通过大气传输时, 由于气体分子和悬浮于大气中的各种固体和液体粒子的吸收和散射作用所引起的能量损失。大气衰减与辐射波长、光程长度及大气物理特性等因素有关。对于均匀大气层, 辐射能的衰减符合指数衰减定律^[9]。

气象学上, 把白光通过 1 km 水平路程的大气透射比称为大气透明度。在一定透明度下, 人眼能发现以地平天空为背景的黑色目标物 (视角大于 $30'$) 的最大距离称为能见度或能见距离 V 。

随着观察距离的增大, 大气散射光对目标物亮度贡献逐渐加大, 致使目标的表现对比度下降, 一直下降到观察者无法分出目标。对人眼而言, 对比度下降到2% (阈值) 时即产生这种情况。

能见距离 V 还可定义为: 目标的表观对比度下降为2%时, 人眼能发现以地平天空为背景的黑色目标物的最大距离。

目标物在 V 距离处的表观对比度为:

$$C_R = e^{-kV}$$

大气的对比传输 $C_R/C_0 = e^{-kV}$, 取对数:

$\ln(C_R/C_0) = -kV$, 由于规定目标物为黑色, 其固有对比度 $C_0 = 1$ 。

根据能见距离 V 处人眼的对比度阈值 $C_R = 0.02$ 。

则: $k = 3.912/V$

大气透过率的计算公式如下:

$$\tau_d = e^{-\frac{3.912}{V}L} \quad (6)$$

不同大气条件下的能见距离 V 由当地气象台给出。按中等透明度能见距离 $V=23.5\text{ km}$ 计算:

$$k = 3.912/V = 0.1665$$

大气透过率 $\tau_d = e^{-0.1665L}$, 其中 L 为目标距离, km 。

2.4 噪声功率因子

微光像增强器噪声功率因子按照下式计算:

$$f = \left[\frac{(S/N)_{in}}{(S/N)} \right]^2 \quad (7)$$

式中: $(S/N)_{in}$ 可由信噪比测试时的实际测试情况计算得到。

信噪比测量时, 是用一个直径为 0.2 mm 的测试光斑覆盖在阴极面输入窗, 用一定照度照亮圆孔光斑, 在荧光屏上测量光斑增强图像的信噪比。

$$f = \frac{A \cdot E_x \cdot S}{2e \cdot B \cdot (S/N)^2} \quad (8)$$

式中: A 为圆斑面积, m^2 ; B 为测量系统等效带宽为 10 Hz 。

在 $E_x = 1.29 \times 10^{-5}\text{ lx}$ 照度条件下检测的信噪比 (如 1XZ18/18 二代像增强器) 时:

$$\begin{aligned} f &= \frac{3.1416 \times 10^{-8} \times 1.29 \times 10^{-5} \times 10^{-6} \cdot S}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10 \cdot (S/N)^2} \\ &= 0.1266 \frac{S}{(S/N)^2} \end{aligned}$$

在 $E_x = 1.08 \times 10^{-4}\text{ lx}$ 照度条件下检测的信噪比 (如 1XZ18/18 超二代管) 时:

$$f = \frac{3.1416 \times 10^{-8} \times 1.08 \times 10^{-4} \times 10^{-6} \cdot S}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10 \cdot (S/N)^2} = 1.06 \frac{S}{(S/N)^2}$$

通用公式:

$$f = 9.817 \times 10^3 \times \frac{E_x \cdot S}{(S/N)^2}$$

2.5 修正后的计算方程

$$\alpha = \frac{1000}{N_K \cdot f'} \quad (9)$$

$$N_K = M \cdot \frac{C \cdot D}{2k \cdot f'} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot \tau \cdot t \cdot e^{-RL}}{2e \cdot f}} \times 10^{-6} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{2k}{MCD} \cdot \sqrt{\frac{2e \cdot f}{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot \tau \cdot \tau_d}} \quad (11)$$

式中: $\rho_1 + \rho_2$ 为目标背景反射率之和, 35% 对比度为 1.34; 85% 对比度为 0.98; E 为夜天光照度, lx ; S 为光电阴极的积分灵敏度, $\mu\text{A/lm}$; τ 为物镜的透过率; t 为人眼的积累时间, 取 0.2 s ; τ_d 为大气透过率, $\tau_d = e^{-\frac{3.912}{V}L}$; V 为能见距离, 中等透明度能见距离 $V=23.5\text{ km}$; L 为目标距离, km 。

用该方程可计算 $1 \times 10^{-1}\text{ lx}$, 85% 对比度下的分辨力。

但应注意, 计算结果若出现系统传函 $M < 0.02$, 该系统是无法识别目标的。此时应用 $M=0.02$ 计算系统的极限分辨力。

3 微光夜视仪的分辨力估算

焦距 $f=25\text{ mm}$, 有效口径 $D=26\text{ mm}$, 超二代像增强器, $1 \times 10^{-3}\text{ lx}$, 35% 条件下的分辨力, 取 $k=1$, $C=0.35$, $e=1.6 \times 10^{-19}$, $S=650$, $S/N=20$, $\tau=0.8$, $\rho_1 + \rho_2=1.34$, $t=0.2$, $\tau_d=0.98$ 。

计算如下:

$$f = 1.06 \frac{S}{(S/N)^2} = 1.06 \times 650 / 20^2 = 1.7225$$

$$\begin{aligned} N_K &= M \cdot \frac{C \cdot D}{2k \cdot f'} \cdot \sqrt{\frac{(\rho_1 + \rho_2) \cdot E \cdot S \cdot \tau \cdot t \cdot e^{-RL}}{2ef}} \times 10^{-6} \\ &= 90.84M \end{aligned}$$

物镜、像增强器、目镜传函, 系统 MTF 如表 1。作系统 MTF 曲线、 N - M 函数, 如图 2。

由两曲线交点, 求得: $N_K=18.65\text{ lp/mm}$, $M=0.2053$, 代入公式(9):

$$\alpha = \frac{1000}{N_K \cdot f'} = 2.144 \text{ mrad}$$

还可通过不断插值计算 M 、 N_K ，直致使 M 、 N_K 值与系统传函和系统空间频率相一致。

表1 系统传函计算
Table 1 Parameters of optical design

频率/ (lp/mm)	物镜	像增强	目镜	系统
	MTF	器 MTF	MTF	MTF
	M_1	M_2	M_3	M
5	0.9	0.9	0.9	0.729
10	0.85	0.75	0.85	0.541875
15	0.8	0.5	0.8	0.32
20	0.75	0.29	0.75	0.163125
25	0.68	0.15	0.68	0.06936
30	0.6	0.08	0.6	0.0288
40	0.5	0.037	0.5	0.00925

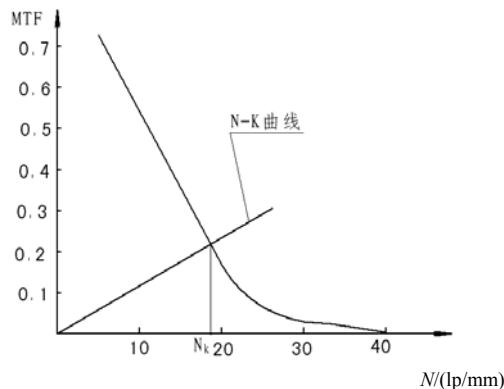


图2 系统空间频率求解实例

Fig.2 Schematic drawing of continuous zoom optical system

4 结论

通过完善和补充，可以看出经修正后的分辨率计算公式(9)、(10)是比较全面的微光夜视仪分辨率计算方程，它把传递函数、焦距、孔径，透过率等光学系统参量、灵敏度，信噪比，传递函数等像增强器参量、环境照度，大气能见距离，目标与背景对比度等环境和天气参量联系起来，可用来分析各因素间的关系及其对整机分辨率的影响。计算结果具有确定性和实用性，是确定微光夜视仪分辨率指标的基础。

参考文献:

- [1] 艾克聪. 微光夜视系统阈值探测理论和视距探测方程研究[J]. 应用光学, 1994, 15(6): 12-21.
- [2] 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): 1-5
- [3] 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.
- [4] 牛燕雄, 汪岳峰, 雷鸣, 等. 微光夜视仪最大作用距离的估算[J]. 光电子·激光, 2000, 11(6): 620-622.
- [5] 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): 342-346.
- [6] 郭晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态评述[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 63-68.
- [7] 胡晓华, 周晓中, 刘松涛, 等. 星载微光立体成像技术及实现[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 701-709.
- [8] 治元龙, 伍小蓉. 实验室条件下微光环境模拟[J]. 激光与红外, 2005, 35(12): 942-943.
- [9] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.