

# 基于成像对比度的微光装备侦察能力研究

荆卫国, 王红培, 栾光琦, 王晨辉  
(中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 针对现有的微光视距模型中变量参数多, 难以适用实际复杂夜天环境中目标侦察能力预测的问题, 本文根据 Ross 方程, 大气光学传输和远距离侦察图像对比度模型, 提出了采用标准靶对比度测试对特定目标侦察能力进行预测的方法, 在特定夜天光环境下完成了标准靶对比度曲线测量, 并基于最小可分辨对比度 (minimum resolvable contrast, MRC) 评价模型, 对坦克、卡车目标的侦察距离进行了预测, 与实际测试值对比, 误差在 16.2% 以内, 验证了采用标准靶对比度测试预测目标侦察距离的可行性, 该项研究成果对不同背景和环境下微光装备侦察能力分析和评价具有指导价值。

**关键词:** 成像对比度; 侦察能力; 微光装备; 大气传输

中图分类号: TN97

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2022)04-0389-08

## Reconnaissance Capability of Low-Light Level Equipment Based on Imaging Contrast

JING Weiguo, WANG Hongpei, LUAN Guangqi, WANG Chenhui  
(Huayin Ordnance Test Center of China, Huayin 714200, China)

**Abstract:** There are several variable parameters in the existing low light level sight range model which makes it difficult to predict the target reconnaissance ability in an actual complex nighttime environment. Based on the Ross equation, atmospheric optical transmission and long-distance reconnaissance image contrast model, this study proposes a method to predict the reconnaissance ability of specific targets using a standard target contrast test, and the standard target contrast curve under specific night light environment is provided. With the contrast curve and minimum resolvable contrast (MRC) model, the reconnaissance distance of tank and truck targets is predicted. After comparing the predicted value with the actual test value, the error is within 16.2%, which verifies the feasibility of using standard target contrast to predict the target reconnaissance distance. The results have value in guiding the analysis and evaluation of low light level equipment reconnaissance capability under different backgrounds and environments.

**Key words:** imaging contrast, reconnaissance capability, low-light level equipment, atmospheric transmission

## 0 引言

夜视技术是研究在夜间或微弱照度下, 光学图像信息的摄取、波段转换、增强、处理、传输、贮存、显示的技术, 是信息技术的高端领域<sup>[1-2]</sup>。以像增强器为核心的直视型微光夜视系统是夜视技术的一大重要分支, 并随各代像增强器技术的发展不断发展。直视型微光夜视系统一般由物镜、像增强器、目镜以及人眼构成, 系统成像性能不仅取决于

各分系统的性能, 人眼与微光夜视系统的匹配状态也直接影响系统成像性能<sup>[3]</sup>。

侦察能力 (探测和识别距离) 是评价直视型微光夜视系统性能的综合指标, 在系统性能评价及设计过程中具有重要的作用<sup>[3-5]</sup>。1948 年 Rose A. 提出了基于光子噪声与阈值信噪比理论的理想成像系统探测模型<sup>[6]</sup>, 将人眼观察视角、亮度、对比度三大要素和信噪比联系在一起; 1954 年 Devries H. L. 对 Rose A. 模型的对比度等参量进行修正得到了改

收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-02-14.

作者简介: 荆卫国 (1964-), 男, 河南三门峡人, 高级工程师, 主要从事侦察情报装备试验鉴定方面的研究工作。

通信作者: 王红培 (1987-), 男, 河南安阳人, 博士, 主要从事侦察情报装备试验技术研究方面的工作。E-mail: realwhp@163.com。

基金项目: 军队试验技术研究重点项目。

进的探测模型<sup>[7]</sup>。1960年 Coltna J. W.<sup>[8]</sup>, 1969年 Richards E. A.<sup>[9]</sup>, 1975年 Sehagen P<sup>[10]</sup>等分别完善, 并给出了相应的理想探测模型。然而, 过于理想的模型条件给应用带来了很大的局限性。为此, Schnitzler A. D.、Rosell F. A.、Richard J. C.等先后于 1971–1982 年间考虑了实际对比度修正、引入微通道板的系统信噪比以及噪声因子等影响因素, 建立了趋近实际的视距模型<sup>[11–13]</sup>。国内研究人员在 1982–2002 年间对理想成像探测模型做了相应的修改和完善, 给出了各自的视距模型<sup>[14–16]</sup>。2003 年南京理工大学常本康和刘磊等综合考虑了实际目标与背景的反射辐射积分灵敏度、对比度衰减及像增强器噪声功率因子等影响, 建立了目前国内行业普遍使用的修正经典视距计算模型(以下简称工业视距模型)<sup>[17–19]</sup>, 并对二代和超二代微光夜视系统取得了较一致的预测效果。2020 年, 金伟其等对直视型微光夜视系统视距模型进行了修订<sup>[4]</sup>, 使得理论值与实测值吻合度进一步提高。尽管现有理论视距模型可以较好地预测微光侦察装备的侦察距离, 但模型中包含众多难以客观测量的参量, 如光谱辐射分布、大气散射吸收系数、背景反射亮度比等, 使得现有模型在实际使用过程中难以对微光侦察装备侦察距离做出预判。

为保证在各种观测装备“查好视力”, 满足野外实际复杂场景的使用, 本文基于大气光学传输和远距离侦察图像对比度模型, 在特定夜天光环境下对标准靶对比度衰减特性进行测量, 并基于该测试数据, 结合最小可分辨对比度(minimum resolvable contrast, MRC)评价模型, 对坦克目标的识别距离进行了预测, 验证了采用标准靶对比度进行目标识别距离预测的可行性。

## 1 微光成像对比度模型

微光装备在夜间的使用环境主要为夜天空的天空亮度, 不同天候条件和相同天候条件下的不同时段, 夜天空的辐照亮度有很大的差异。

设 $\rho_T(\lambda)$ 和 $\rho_B(\lambda)$ 为目标和背景的光谱反射率, 当目标和背景被相同的辐射源(月亮、夜光或星光)照射时, 目标和背景的反射亮度表示为<sup>[5]</sup>:

$$L_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_T(\lambda) L_e(\lambda, T_{III}) d\lambda \quad (1)$$

$$L_B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_B(\lambda) L_e(\lambda, T_{III}) d\lambda \quad (2)$$

式中:  $L_T$ 、 $L_B$  分别表示目标反射亮度、背景反射亮度;  $\rho_T(\lambda)$ 、 $\rho_B(\lambda)$  分别表示目标光谱反射率、背景光

谱反射率;  $L_e(\lambda, T_{III})$  为光谱辐照度;  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为辐射源辐射波长范围。

由式(1)和式(2)可见, 影响微光装备成像的主要因素是夜间微弱光条件下的目标和背景亮度, 这一亮度取决于目标和背景表面对夜天光的反射, 反射亮度与天空亮度和场景的光谱反射率相关。光谱反射由目标和背景的反射特征决定, 当目标与背景反射率存在差异时, 目标才能从背景中区分出来。

假定目标表面面元为漫反射面, 假设目标表面的漫反射系数与波长无关, 设目标面元  $dA$  的法线与月亮方向的夹角为  $\theta$ , 月亮辐射在空间目标表面的亮度为  $E_{\text{moon}}$ ; 目标与探测器之间的距离为  $R$ , 探测器的光学系统参数为  $f_r$ ; 则目标在与面元  $dA$  法线方向为  $\theta$  角的观测方向上反射夜天光在探测器入瞳处产生的光谱辐照度为<sup>[20]</sup>:

$$E_{dA} = \frac{f_r E_{\text{moon}} \cos \theta_i \cos \theta_r dA}{R^2} \quad (3)$$

可以看出, 由于不同天候下夜天光的环境照度变化大, 目标和背景的反射又与目标与背景的材料(反射率)、结构特征、表面粗糙度等多种因素有关, 实际使用时还与夜天光的照射角、对目标的观察角、反射后的观察距离等多种因素有关等, 因此, 用数学模型对夜天空下目标和背景的反射特性进行描述存在很大的不确定性。为了减小这些不确定因素影响, 本文用目标与背景图像对比度来表征目标与背景的成像差别。

从表述方式上, 对比度包括绝对对比度和相对对比度。本文研究中, 微光装备成像对比度采用相对对比度定义, 其表达式为:

$$C = \frac{|L_T - L_B|}{L_B} = \frac{\Delta L}{L_B} \quad (4)$$

## 2 微光成像对比度测试方法分析

在微光装备野外试验中, 被观察目标往往是坦克、卡车、人员等实体目标, 背景可能是草地、树丛、裸露地表、天空等自然背景, 观察环境有不同的照度条件, 这些因素都造成了目标和背景之间的灰度对比度呈现出无限多样性, 也为图像对比度的测试提出许多需要解决的实际问题。

微光成像对比度测试是对包括目标和背景的场景一起成像, 将采集的图像中的每一个像素点用灰度值表示, 在图像中分别选择目标和背景的相关区域, 计算所选区域的平均灰度, 根据目标与背景灰度值处理得到目标与背景的对比度。根据 Ross 方

程<sup>[5]</sup>:

$$L\alpha^2C^2 = \text{常数} \quad (5)$$

式中:  $L$  为目标亮度;  $\alpha$  为对目标的极限分辨角;  $C$  为需要的靶板线条对比度。

从上式可以看出, 在靶板亮度不变的条件下, 能够分辨出目标的极限分辨角与需要的靶板对比度成反比, 在靶板的极限分辨角不变的条件下, 靶板的对比度的平方与亮度成反比。因此, 低照度条件下, 不仅会损失目标的极限分辨角, 而且会明显损失图像对比度。

### 2.1 成像对比度测试方法

#### 1) 对比度测试设备的选择

对微光装备而言, 由于各装备之间的探测器(或像增强器光阴极)响应灵敏度不同、图像增强器的设置不同、光学系统的光学结构设计不同会表现出不同的图像对比度关系。在图像对比度测试中, 有两种应用方向需要考虑: 一种是将图像对比度作为装备试验条件的一项表征参数, 另一种是利用测试得到的图像对比度进行装备的作用距离预测。对于第一种情况, 可以建立标准的对比度测试设备, 经过计量标定后应用于图像对比度测试。对于第二种情况, 由于在同一种环境下不同装备的成像对比度变化不同, 需要用被测装备自身或同一型号的被试装备采集图像来进行对比度测试。

#### 2) 测试距离的设定

野外条件下的目标与背景的微光对比度测试需要在一定夜天空环境下和在一定距离处采集对比度测试图像。测试距离的确定应使得目标在图像中尽可能大一些, 比如坦克、卡车等实体目标的长度占测试视场的  $1/2 \sim 2/3$  以上, 如图 1 所示, 尽量避免

由于图像中的目标过小导致的目标与背景对比度下降。



图 1 野外对比度测试中测试距离的选择

Fig1 Selection of test distance in field contrast test

#### 3) 测试方向的选定

目标与背景对比度测试需要使所采集的图像中的目标与背景的相对关系与在远距离观察时目标与背景的相对关系基本一致。如果受到图像采集位置地域条件的限制, 目标与背景的相对位置关系与远距离观察时存在一些偏差, 可以在对比度计算和处理时, 选定与远距离观察相同或相近的背景进行处理和计算。如图 2 所示, (a) 图为对比度测试方向与微光装备观察方向一致的情况, 此时对比度测试图像的目标和周围场景关系与微光成像中的目标和周围场景关系的表现一致; (b) 图为二者方向不一致时的情况, 如图所示, 目标与周围场景的对比关系会发生变化, 因此对比度的测试结果也会带来一定偏差。



(a) 与观测方向一致

(a) Consistent with the observation direction



(b) 与观测方向不完全一致

(b) Not completely consistent with the observation direction

图 2 野外对比度测试中测试方向的选择

Fig.2 Selection of test direction in field contrast test

## 2.2 目标与背景的选定和处理

野外环境下，目标所处的背景条件可能差别很大，沿着观察方向目标后面的背景可能是相对单一或变化不明显的“均匀”背景，也可能是变化明显的复杂背景，在进行目标与背景对比度测试和计算时需要区分不同的背景条件。

### 1) 当目标周围的背景相对单一或“均匀”时

如果微光装备所成图像中背景相对比较单一或“均匀”，所成图像中与目标紧邻的背景变化不太明显，可以分别选定具有代表性的目标和近邻目标的背景的部分区域，读取灰度值和进行对比度计算。如图3所示。

### 2) 当目标周围的背景相对复杂时

如果目标周围的背景比较复杂，所成图像中与目标紧邻的背景变化明显，再用上述方法选定背景区域，可能会造成由于选定背景区域的不同，产生差异较大的背景灰度结果，因此，用这种方法计算的图像对比度也会产生较大差异。如图4所示。

在试验背景复杂的情况下，对影响目标进行判读的目标及其周围背景从图像中截取下来并适当放大，并将其另存为一副新的图像矩阵，在包含目标和背景矩阵图像中减去背景，形成一个目标矩阵，

计算目标的像素数和总灰度值，用总的灰度值与总的像素数计算平均灰度值。按照同样的方法计算背景图像的平均灰度值，最后计算对比度。

## 2.3 图像对比度测试的标定

图像对比度的标定用经过计量的不同灰度等级的靶板进行，但是由于靶板的标定是在白天条件下进行的标定，与低照度条件下的靶板表现出来的对比度不同。为了更准确地反应反射对比度，需要在模拟夜天光环境下对靶板的对比度进行标定。

标定时用微光装备对某一灰度对比度的靶板成像，在特定夜天光环境分别采集和读取黑块和白块的灰度值，计算图像的相对对比度。以此可以建立微光装备对该靶板在不同低照度下的对比度随照度变化的关系曲线。选取不同灰度对比度的靶板重复上述测试，可以得到不同灰度对比度靶板随照度变化的关系曲线，利用这些曲线可以外推至任意照度下对任意灰度对比度靶板的成像对比度相对关系。

本文利用微光分辨力靶板作为标准靶板进行标定，标定中为了避免不同空间频率靶板线条对图像对比度测试的影响，选择靶板中尽可能大的黑块和白块进行标定，标定示意如图5所示。



图3 单一背景的野外对比度测试

Fig.3 Field contrast test with single background



图4 复杂背景的野外对比度测试

Fig.4 Field contrast test of complex background

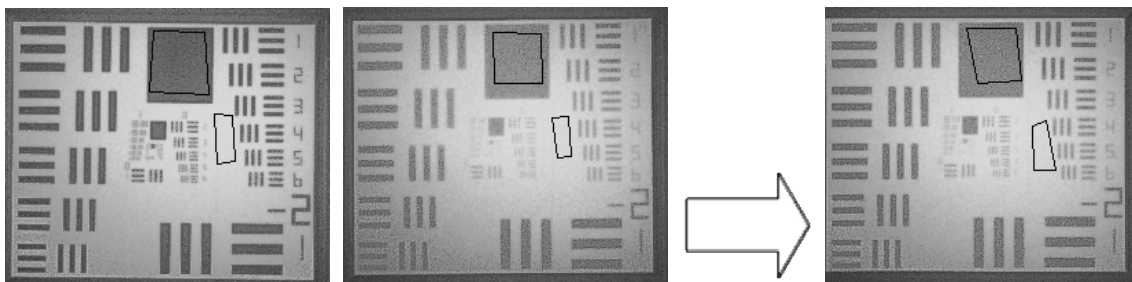


图5 图像对比度标定

Fig.5 Image contrast calibration

### 3 大气传输对微光图像对比度的影响

#### 3.1 大气光学传输计算

微光装备进行远距离目标侦察时会受到大气中气体分子的吸收,气溶胶会对光学辐射造成散射,恶劣天候条件下会造成图像的严重衰减,大气衰减会造成目标与背景对比度的降低。在相对稳定的大气环境中,气体分子的吸收和气溶胶的散射是造成图像衰减的主要因素。

在微光装备的工作波段,大气分子的吸收主要表现为水蒸汽的吸收。水蒸汽的透射性能与大气密切相关,可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\tau_{H_2O} = 1 - e^{-\alpha_2 \omega} \quad (6)$$

式中:  $\alpha_2$ 为对波长为 $\lambda$ 光线的吸收系数;  $\omega$ 为可降水量。

气溶胶质粒的衰减系数可用能见距离  $R_v$  的经验公式表示为:

$$\sigma = \frac{3.912}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q \quad (7)$$

式中:  $\lambda_0=0.55 \mu\text{m}$ ;  $\lambda$ 为当前传输波长;  $q$ 为与能见距离有关的修正因子。

对于微光波段,大气传输透射比,即:

$$\tau_s(\lambda, R) = \exp\left[-\frac{3.912}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q R\right] \quad (8)$$

式中:  $R_v$ 为大气能见度,  $\lambda_0=0.55 \mu\text{m}$ 。

每个波段间隔总的透射比等于各单项透射比之积,对每个波段间隔进行积分计算除以总的波段间隔数可以得到平均透过率。

$$\tau_n = \tau_{nH_2O} \times \tau_{ns} \quad (9)$$

式中:  $\tau_{nH_2O}$ 为水汽的吸收比;  $\tau_{ns}$ 为气溶胶的散射透射比。

特定波长处的光谱辐射强度受月相、天气等因素影响,如不同月相时辐照度如表1所示<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 远距离侦察时的图像对比度计算

根据传递函数理论,设目标在近距离的初始对比度为  $C_0$ ,大气调制传递函数为  $MTF_{atm}$ ,观测装备的调制传递函数为  $MTF_{sys}$ ,当在远距离观察时,输出的图像对比度为  $C_{out}$ ,则有:

$$C_{out} = C_0 \cdot MTF_{sys} \cdot MTF_{atm} \quad (10)$$

可以看出,微光装备在对目标进行远距离观察时,输出图像的对比度除了与目标和背景的固有对

比度有关外,还与微光装备的图像传递函数和大气图像传递函数有关。在实际试验时,用同一台微光装备或性能相近的装备分别在近距离进行对比度测试和远距离观察,式(10)中的  $MTF_{sys}$  分别在近距离和远距离处都是作为一个相同的固定值表现在固有对比度  $C_0$  中。于是,式(10)变为:

$$C_{out} = C_0 \cdot MTF_{atm} \quad (11)$$

表1 月光、星光、1/4月光+星光的辐照度

Table 1 Moon light, starlight, 1/4 Moon light and starlight irradiance

$\lambda/\mu\text{m}$	Moon light /( $10^{-4} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Starlight /( $10^{-4} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	(1/4 moon & starlight)/( $10^{-4} \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )
0.40	6.00	0.130	1.63
0.45	10.20	0.16	2.71
0.50	14.40	0.28	3.88
0.55	15.60	0.46	4.36
0.60	15.10	0.56	4.34
0.65	13.40	0.65	4.00
0.70	12.00	0.78	3.78
0.75	10.50	0.98	3.61
0.80	9.95	1.30	3.79
0.85	8.87	1.59	3.81
0.90	7.38	1.96	3.81
0.95	6.14	2.40	3.94
1.00	5.10	2.90	4.18

远距离观察目标时,在光路上可看到两种光:一种是经目标和背景反射的亮度,另一种是由大气散射产生的辐射亮度,两束光共同合成了目标和背景的表现亮度。经大气衰减之后的目标与背景的图像对比度表达式为<sup>[5]</sup>:

$$C_{out} = \frac{\exp(-\sigma R)(\rho_T - \rho_B)L_e}{\exp(-\sigma R)\rho_B L_e + L_{atm}} \quad (12)$$

式中:  $\rho_T$ 、 $\rho_B$ 为目标反射率和背景反射率;  $L_e$ 为环境亮度;  $L_{atm}$ 为路径辐射亮度,为目标与成像系统之间的距离;  $\exp(-\sigma R)$ 为大气透过率。

上式可写成:

$$C_{out} = C_0 \frac{1}{1 + \frac{L_{atm}}{\rho_B L_e} \exp(\sigma R)} \quad (13)$$

进入成像系统的路径辐射亮度  $L_{atm}$  可近似由下式表达:

$$L_{atm} \approx [1 - \exp(-\sigma R)] \cdot L_{sky} \quad (14)$$

式中： $L_{sky}$  为大气立体角亮度，是一个观察方向和位置相关的函数。

将式(14)代入到式(13)，有：

$$C_{out} = C_0 \frac{1}{1 + \frac{(1 - \exp(-\sigma R)) L_{sky}}{\rho_B L_e} \exp(\sigma R)} = C_0 \frac{1}{1 + \frac{L_{sky}}{\rho_B L_e} (\exp(\sigma R) - 1)} \quad (15)$$

令：

$$K = \frac{L_{sky}}{\rho_B L_e} \quad (16)$$

则有：

$$C_{out} = C_0 \frac{1}{1 + K (\exp(\sigma R) - 1)} \quad (17)$$

式中： $K$  为天空亮度和背景亮度之比。其中：

$\frac{1}{1 + K (\exp(\sigma R) - 1)}$  即为大气传递函数  $MTF_{atm}$ 。即：

$$MTF_{atm} = \frac{1}{1 + K (\exp(\sigma R) - 1)} \quad (18)$$

### 3.3 关于 $K$ 值的讨论

式(17)中，在大气条件已知的条件下，固有对比度  $C_0$  可由近距离采集的图像中得到，只有  $K$  是未知量。根据式(16)， $K$  为天空亮度和背景反射亮度之比。根据相关资料，典型天空状态和背景组合的  $K$  值如表 2 所示<sup>[5]</sup>。

表 2 典型  $K$  值表

Table 2 Typical $K$ value table		
Sky condition	Background	$K$ value
Sunny	Fresh snow	0.2
Sunny	Desert	0.4
Sunny	Forest	0.5
Cloudy	Fresh snow	1
Cloudy	Desert	7
Cloudy	Forest	25

典型  $K$  值下的归一化表观对比度随距离变化的曲线如图 6 所示。从图中观察可知，相同距离情况下， $K$  值不同，归一化表观对比度不同，尤其是在  $0 \sim 1$  km 范围内，差异较大，而这个范围是微光夜视观测装备的大概侦察距离范围。

由于微光夜视观测装备在实际使用时， $K$  值的不同直接影响远距离的图像对比度  $C_{out}$ ， $C_{out}$  会影响后续的侦察能力估算。因此，在实际预测过程

中有必要进一步明确  $K$  值取法。实际试验中  $K$  值可以采用两种途径获得：一是在微光装备现场采集的图像中，选取天空和对观察方向的背景亮度，根据各自灰度计算  $K$  值。二是用照度计分别测量天空和观察方向的背景照度计算  $K$  值。

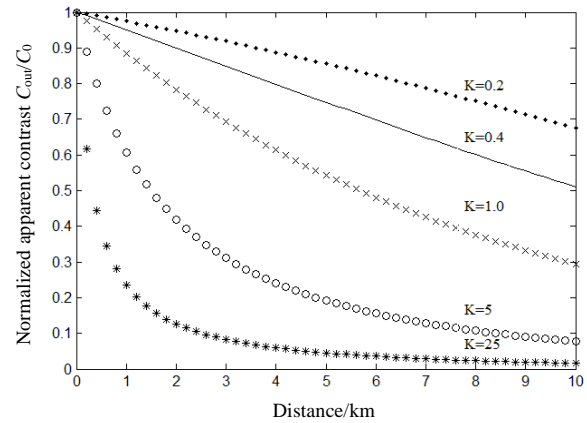


图 6 典型  $K$  值下的归一化表观对比度随距离变化的曲线

Fig.6 Normalized apparent contrast versus distance at typical  $K$  values

## 4 微光装备侦察能力计算

### 4.1 侦察能力计算方程

根据 MRC 理论，对于扩展源目标，通过观测装备能够探测、识别和认清目标的条件是：1)目标具有足够的张角；2)目标背景的表观对比度应大于等于微光观测装备的可分辨对比度<sup>[22]</sup>。因此，微光装备的侦察能力方程表示为：

$$\begin{cases} \frac{H}{NR} \geq \frac{1}{f} \\ C_{out} \geq MRC[f, L_m(R)] \end{cases} \quad (19)$$

式中： $H$  为目标等效尺寸； $C_{out}$  为目标背景表观对比度； $f$  为空间频率； $N$  为探测、识别和认清及其概率条件下的等效条带数； $R$  为侦察距离； $L_m(R)$  为景物表观平均亮度。

满足式(19)的最大距离  $R_{max}$  即为微光装备在探测、识别和认清及其概率条件下的侦察距离。

在恶劣天气、目标与背景反射较为接近、极低照度条件等试验环境下，虽然目标在图像中占有足够多的像素数，但由于图像对比度较低，仍然会造成难以从背景中将目标分辨出来，这时用 Johnson 准则对目标进行判定就会出现较大偏差。

在远距离情况下，设显示器平均亮度下人眼的阈值对比度为  $C_T$ ，当  $C_{out} \geq C_T$  时人眼才能区分目标和背景：

$$C_{out} = C_0 \frac{1}{1 + K(\exp(\sigma R) - 1)} \geq C_T |_{L_{disp,LLL}} \quad (20)$$

由于人眼对比度阈值是一个与显示器亮度有关的函数,通常情况下人眼的阈值对比度在 1.5%~5%之间,通常取 2%。

微光观测装备侦察距离计算示意图如图 7 所示。图中,  $C_{out}$  为图像对比度,  $C_T$  为阈值对比度函数。 $C_{out}$  大于  $C_T$  时,可探测到目标,对应的最大距离即为侦察距离。

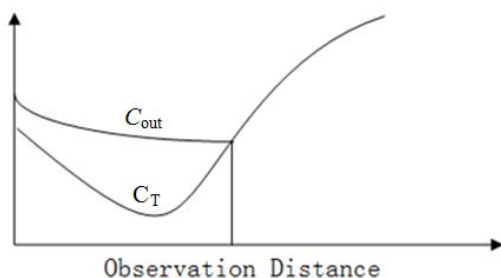


图7 微光观测装备侦察距离计算示意图

Fig.7 Schematic diagram of reconnaissance distance calculation of low light level observation equipment

## 4.2 计算实例

### 1) 图像对比度计算

用微光望远镜采集微光靶板图像,得到真实标准靶对比度,如在环境照度  $3.2 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 、温度  $6^\circ\text{C}$ 、相对湿度 48% 的夏季午夜,标准靶对比度与真实标准靶对比度误差为 4.2%。根据实测环境中环境照度、温湿度等参数,通过自主建立的野外夜天光数据库查表,获得大气衰减系数  $\sigma$ 。

### 2) 野外作用距离试验

在上述夜天光测试条件下,分别对单兵、卡车、坦克等目标的作用距离进行实验,试验和计算结果如下:

微光望远镜对裸露地表中的单兵目标侦察,实测侦察距离 635 m。根据表 2 选取  $K$  值为 25,利用真实标准靶对比度测量后查表得到的  $\sigma$  值,最后利用公式(20)计算得到探测目标距离与成像对比度  $C_{out}$  的曲线,如图 7 所示,根据该曲线与人眼对比度曲线  $C_T$  的交点确定探测距离,得到理论值侦察距离为 738 m,相对误差为 16.2%;按照该方法对卡车和坦克目标进行视距计算,微光望远镜对树林背景中的卡车目标侦察,实测侦察距离 815 m,理论计算 796 m,相对误差为 2.3%;微光望远镜对树林背景中的坦克目标侦察,实测侦察距离 791 m,理论计算 718 m,相对误差为 9.2%。

## 5 结束语

微光装备侦察能力是一项与目标、背景、野外大气和照度环境等多种因素密切相关的综合性参数,是微光装备的核心指标,在微光装备试验和评价中,要充分考虑不同环境、目标和背景条件对装备侦察能力的影响。本文以图像对比度为切入点,将图像对比度作为表述不同环境背景下目标与背景之间的差异关系,有效解决了试验中目标和背景关系难以明确描述的难题;计算模型微光装备的设计参数和部件参数,建立在整机的可测试参数基础上,克服了以往模型研究中计算模型复杂、需要代入的设计参数多、部分部件参数难以获取等问题,建立了基于图像对比度的侦察能力试验和评价模型,并可实现多种环境条件下的侦察能力外推计算。

## 参考文献:

- [1] 田金生. 微光像传感器技术的最新进展[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 527-534.  
TIAN Jinsheng. The latest development of low light level image sensor technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 527-534.
- [2] 艾克聪. 微光夜视技术的现状和发展设想[J]. 应用光学, 1995, 16(3): 11-22.  
AI Kecong. Present situation and development of low light level night vision technology[J]. *Applied Optics*, 1995, 16(3): 11-22.
- [3] 金伟其, 高稚允, 苏学刚, 等. 光电成像系统与人类视觉的匹配问题[J]. 红外技术, 2000, 22(5): 40-44.  
JIN Weiqi, GAO Zhirun, SU Xuegang, et al. Matching between photoelectric imaging system and human vision[J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(5): 40-44.
- [4] 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): 0411001.  
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): 0411001.
- [5] 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.  
BAI Tingzhu, JIN Weiqi. *Principle and Technology of Photoelectric Imaging*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [6] 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.
- [7] DEVRIES H L. The quantum character of light and its bearing upon the threshold of vision[J]. *Physica*, 1954, 7(7): 553-556.

- [8] COLTMAN J W, ANDERSON A E. Noise limitations to resolving power in electronic imaging[J]. *Proceedings of the IRE*, 1960, **48**(5): 858-865.
- [9] RICHARDS E A. Limitations in optical imaging devices at low light levels[J]. *Applied Optics*, 1969, **8**(10): 1999-2005.
- [10] SCHAGEN P. Electronic aids to night vision[J]. *Electronics & Power*, 1975, **21**(7): 437-439.
- [11] SCHNITZLER A D. *Visual Systems for Night Vision*[M]. US: Springer 1971.
- [12] ROSELLF A, WILLSON R H. Basics of detection, recognition and identification in electro-optical formed imagery[C]//*Solving Problems in Security, Surveillance and Law Enforcement with Optical Instrumentation*, 1973: DOI:10.1117/12.953625.
- [13] RIEHARD J C, LAMPORT D L, ROAUX E, et al. Performance of passive night vision systems using image intensifier tubes[J]. *Acta Electron*, 1977, **20**(4): 353-368.
- [14] 邹异松. 成像器件的图象探测特性[J]. *北京工业学院学报*, 1982(1):17-28.  
ZOU Yisong. Image detection characteristics of imaging devices[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1982(1): 17-28.
- [15] 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): 1-6.0411001-9  
AI Kecong, ZHOU Liwei, ZENG Guilin, et al. Research on new threshold detection theory and apparent distance equation of the low-light night vision system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, **23**(5): 1-6.
- [16] 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.
- [17] 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**(60): 761-765.  
LIU Lei, CHANG Benkang. Correction of the theoretical formula of low-light imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(60): 761-765.
- [18] 刘磊, 李元, 钱芸生, 等. 用于微光夜视系统性能评估的新方法[J]. *应用光学*, 2006, **27**(6): 546-551.  
LIU Lei, LI Yuan, QIAN Yunsheng, et al. New method for visual range evaluation and scene simulation of low-light level(LLL) night vision systems[J]. *Journal of Applied Optics*, 2006, **27**(6): 546-551.
- [19] LIU Qiankun, LIU Lei, DENG Yubin, et al. Apparent distance theory revision for low-light-level night vision system based on noise factor[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, **49**(7): 249-264.
- [20] 刘建斌, 吴健. 空间目标的光散射研究[J]. *宇航学报*, 2006, **27**(4): 802-805.  
LIU Jianbin, WU Jian. Study on light scattering of space targets[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, **27**(4): 802-805.
- [21] 周立伟. *目标探测与识别*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.  
ZHOU Liwei. *Target Detection and Recognition*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.
- [22] 金伟其, 高绍妹, 王吉晖. 基于光电成像系统最小可分辨对比度的扩展源目标作用距离模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1552-1556.  
JIN Weiqi, GAO Shaoshu, WANG Jihui. Extended source target range model based on minimum resolvable contrast of photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1552-1556.