

〈微光技术〉

微光助视下夜视仪效能分析及特征参数表征

陶 勇¹, 王 勇², 周明善³

(1.中国人民解放军驻 9804 厂军代室, 云南 曲靖 655000; 2.中国人民解放军 77611 部队, 西藏 拉萨 850000;
3.云南开放大学化学工程学院, 云南 昆明 650223)

摘要: 为科学评价微光夜视仪的性能指标和作战效能, 系统分析了微光夜视系统视距探测方程及微光助视效能, 阐明了“微光增视可以提高观察距离多少倍”的说法不宜作为衡量助视效能的技术指标。定义并表征了微光助视效能的 4 个特征参量: E_m 、 E_x 、 E_y 、 E_b 。靶场实验结果表明: 当夜天环境照度为 0.6×10^{-3} lx 时, 微光夜视仪难以获得清晰的景物图像, 通过微光助视, 施加特征参量 E_x 后, 微光夜视仪处于理想的工作状态。

关键词: 微光夜视仪; 视距; 微光助视; 照度

中图分类号: TP802⁺⁵, TN223 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)07-0443-05

Effectiveness Analysis and Characteristic Parameters Characterization of Night Vision System under the Twilight Aids

TAO Yong¹, WANG Yong², ZHOU Ming-shan³

(1.The Chinese People's Liberation Army Office Stationed in 9804 Factory, Qujing 655000, China;
2.Unit 77611 of the Chinese People's Liberation Army, Lasa 850000, China;
3.School of Chemical Engineering, Yunnan Open University, Kunming 650023, China)

Abstract: In order to properly evaluate the performance and efficacy of low light level(LLL) night vision systems, the visual range detecting equation and twilight aids effectiveness of LLL night vision system are analysed systematically. The results show that the “twilight aids can improve observation distance several times” should not be a technical indicator to determine the twilight aids effectiveness. The four characteristic parameters(E_m 、 E_x 、 E_y 、 E_b) of twilight aids effectiveness are defined and characterized respectively. The target range experiment results show that LLL night vision system could not obtain a clear image of the scene when the environmental illuminance is 0.6×10^{-3} lx and the LLL night vision system can work normally under twilight aids applying characteristic parameter E_x . The four characteristic parameters of twilight aids effectiveness have the important guiding significance to research twilight aids technique.

Key words: low light level night vision system, visual range, twilight aids, illuminance

0 前言

微光夜视仪发展于 20 世纪 60 年代, 它是利用夜天环境的星光、月光和大气辉光, 通过像增强器达到人眼能进行观察的一种夜视仪器, 属于被动方式工作, 自身隐蔽性好。但受自然光照度和大气透明度影响, 有时图像模糊、层次不够分明^[1-3]。为使微光夜视仪在极低的照度下也能观察目标, 自 1989 年美国首

次披露红外照明弹研制信息, 并称红外照明可使微光夜视仪的观察距离增加 4~7 倍^[4-5]之后, 国内便开始了有关试验、药剂及型号的探索研究工作^[6-10], 增加微光夜视仪观察距离的倍数, 也便成了衡量助视效果的主要技术指标^[11]。然而, 某些场合下从对微光夜视仪附加人工“照明”前后发生的变化中, 并不存在提高视距倍数的合理数学关系。可是在这一指标的引导下, 为了追求增加观察距离的倍数, 其结果有时却恶

收稿日期: 2013-02-01; 修订日期: 2013-04-19。

作者简介: 陶勇 (1969-), 男, 博士研究生, 主要从事特种弹药的研究。

通讯作者: 周明善 (1971-), 男, 副教授/博士, 从事光电对抗与无源干扰研究。

基金项目: 云南省教育厅应用基础研究重点基金项目, 编号: 2010Z107。

化了微光夜视仪的观察效果。为此,本文从微光夜视仪工作特性入手,基于视距探测方程及微光助视效能分析,发现“红外照明可以提高微光夜视仪观察距离多少倍”的说法是一个不够全面,或者在概念上产生了偏差的指标,并定义和表征了微光助视下夜视仪效能分析的4个特征参量。

1 微光夜视仪工作特性分析

1.1 分辨角

微光夜视仪的分辨角与仪器设计性能及被观察目标的亮度、对比度等多种环境因素有关。对于光电子成像系统,其分辨角 α 可表示为^[12]:

$$\alpha = \frac{1}{f \cdot N_c} \quad (1)$$

式中: f 为系统物镜焦距,mm; N_c 为系统的极限鉴别率,lp/mm,对于微光夜视仪,可概略地用像增强器的极限鉴别率表示。

在实际应用中,分辨角 α 是在暗室内稳定的标准光源照射条件下测定的,使用微光夜视仪时,能够观察到目标的条件是其分辨角 α 必须小于该目标对微光夜视仪的张角 α' 。张角 α' 与观察距离和目标的形体尺寸有关:

$$\alpha' = H/L \quad (2)$$

式中: H 为目标形体中的最小尺寸,m; L 为目标至仪器的距离,m。

对同一个目标,距离愈远,其张角愈小。所以近距离目标容易观察到,当距离远到使 $\alpha' < \alpha$ 时,就观察不到该目标了。

1.2 视距探测方程

视距是微光夜视系统各个参数的综合反映,是检验微光夜视仪性能的重要指标。视距的观察等级分为发现距离、识别距离和辨认距离^[13]。其中具有代表性的有:Richards等人导出的探测方程^[14]。根据经典微光成像理论,文献[15-18]等对微光成像系统的探测方程进行了修正,其微光成像系统视距 R_L (m)的理论公式为:

$$R_L = \frac{f'_0 A_K H_t}{N_e} \quad (3)$$

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、识别或辨认目标所需的空间频率; A_K 为系统分辨率,lp/mm,其中^[19-21]:

$$A_K = 0.716 \times 10^3 \frac{C_0 C_d M(A_k) D}{\Phi_{\min} f'_0 \beta(G)} \left(\frac{S_A \alpha_\lambda t \varepsilon \bar{\rho} E_0 \tau_0 \tau_d}{F_\phi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

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MTF值; D 为物镜直径,mm; Φ_{\min} 为人眼阈值信噪比; S_A 为光电阴极对标准A光源的积分灵敏度, $\mu\text{A/lm}$; α_λ 为光谱转换系数; t 为积累时间,s; ε 为目标长宽比; $\bar{\rho}$ 为景物平均反射率; E_0 为夜天空照度,1x; τ_0 为物镜透过率; τ_d 为大气透过率; F_ϕ 为像增强器噪声功率因子; $\beta(G)$ 为人眼的分辨角与在照度为1000lx时的人眼分辨角的比值。

由式(3)可知,微光成像系统的视距取决于像增强器的性能,即系统空间分辨率,分辨率越高,系统分辨景物的能力越强,探测目标距离就越远。式(4)综合分析了目标参量(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)、仪器的物镜参数(直径、焦距及透射率)及器件参量(光电阴极积分灵敏度、光谱转换系数、系统的积累时间及对比度传递衰减)等因素对探测距离的影响和作用,而得到的微光成像系统探测方程。

通过对微光成像系统探测方程的分析研究和前期实验表明,对具体的微光夜视仪,若能通过人工辅助措施,改善以下几个因素:

①目标与背景的初始对比度 C_0 ;②景物反射辐射光谱与光电阴极响应光谱的匹配关系,即仪器对景物反射辐射的积分灵敏度 S_A ;③景物的照度 E_0 。

则可以起到改善微光夜视仪观测效果的作用,即加大目标与背景的初始对比,提高景物反射辐射光谱与光电阴极响应光谱的匹配系数,增大景物的照度等可以增强微光夜视仪的观测效果。

1.3 捕获景像特性

微光夜视仪并非在所有的夜天环境下都能够实现夜间观察,其图像的明亮清晰程度,受光子噪声、系统光学性能的影响。目前装备超二代像增强器的微光夜视仪,只有在晴朗无月星空到晴朗满月星空的夜天气象条件下(对应的地面照度分别是 10^{-3} lx、 10^{-1} lx),才能捕获到由目标反射的适量光子处于正常工作状态。以某型号班用枪瞄镜为例,暗室中通过观察标准靶获得的夜视仪的分辨角 α 随照度值的变化关系如图1。

由图1可知,照度值从 10^{-3} lx向 10^{-1} lx增加过程中分辨角 α 开始迅速下降,在接近 10^{-1} lx时 α 值的变化趋于平缓,亦即趋向仪器的极限分辨角。这就意味着该瞄准微光镜在地面照度接近 10^{-1} lx时其工作达到了理想状态。

在上述夜天条件下,微光夜视仪基本处于正常或理想工作状态,但如果存在不适当的外界干扰,如城

市辉光、其他杂散光等影响时,使地面环境照度增大到 10^{-1} lx以上,此时,微光夜视仪正常的工作状况将被破坏,信噪比趋于降低,图像质量产生恶化,不能清晰观察到目标图像。

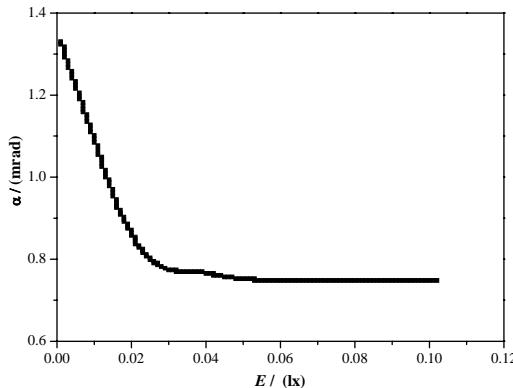


图1 某型班用枪族微光瞄准镜实测 α -E的关系

Fig.1 The relationship between α and E of a class family low light level night vision system

在无星无月、天空浓云密布的夜天环境下,地面获得的照度值大约在 10^{-5} lx左右或更低。此时,微光夜视仪捕获到的光子数量极少,仪器处于极低的信噪比状态下工作,荧光屏也显示不出图像。

综上所述,当夜天光极其微弱和环境辐照很弱时,微光夜视仪均很难进行有效夜视观察。

2 微光助视下夜视仪效能分析

从微光夜视仪捕获景象特性可知,微光夜视仪的工作状态可划分为三个明显的阶段,即:环境照度极低及环境照度高于某值时,微光夜视仪均得不到清晰景物图像;环境照度处于某一有限范围时,微光夜视仪可以实现正常观测。因此,微光增视效能根据不同工作阶段也应该相应地有不同的评价标准。

2.1 当环境照度低于 10^{-5} lx时

环境照度极低情况下,微光夜视仪或者显示不出景物图像,或者显示出的是布满噪声的画面。此时最需要微光助视,也是微光助视最能发挥效能的场合。施放红外照明弹后,在助视区域内微光夜视仪可捕获到充足数量的光子,瞬间显示出清晰的景物图像。景像从无到有,其助视效果亦是从无到有的突变,观察距离从0m达到一定值,不存在观察距离增加多少倍数的数学关系。此时,微光夜视仪所能获得的由目标反射的辐照几乎全部由红外照明弹提供。此时,微光助视照度值的大小是关键问题。

2.2 当环境照度处于 10^{-3} lx~ 10^{-1} lx时

对于大多数微光夜视仪来说,此时可获得目标反

射的一定数量的光子,处于正常工作状态。若夜天辐照不充足,地面照度靠近 10^{-3} lx时,适当附加微光助视辐照,显然会有效增强景物图像的明亮清晰程度;若夜天辐照很充足,地面照度在 10^{-1} lx左右,微光夜视仪的工作接近饱和状态时,再继续增大附加微光助视辐照,则有可能破坏微光夜视仪正常的工作状态,恶化观察效果。显然,微光助视应用于这种场合时,对附加的微光助视辐照值就有一个度的掌握问题。

在靶场试验微光助视效果时,有时可以观察到如下现象:助视前,由于视场内辐照条件不够充足,只能发现、识别或辨认近处目标,比如可以发现距离大约在200m处的人,附加微光助视后,便发现了约1400m处的坦克和400m处人。以前在表述微光助视前后观察距离发生的变化时,把近处的人与远处的坦克相比说是观察距离提高了约7倍,或者把近处的人和远处的人相比说是观察距离提高了约2倍,客观上这种由实际观察而获得的观察距离提高的倍数,只是在一定的试验条件下概略的反映了人的直观视觉效果,没有较为科学的反映出微光助视效果的实质。比如,在上述靶场试验条件下,若更远处还有一座很大的建筑物,只要它的张角与1400m处的坦克和200m处的人大致相等,微光助视后微光夜视仪同样可以观察到它,对它的助视距离可以说提高了十几倍甚至几十倍。而对小形体尺寸的目标,比如上述在200m处发现的人,若它处在800m处,距离仅仅增加了4倍,由于其张角已小于微光夜视仪的极限分辨率,即便再实施微光助视,也不可能再观察到了。所以,仅在有限试验条件下由观察者直观获得的观察距离提高的倍数,不宜于作为衡量助视效能的技术指标。

2.3 当环境照度高于 10^{-1} lx时

目标区域的照度值大于 10^{-1} lx,微光夜视仪已达到饱和工作状态,在这种场合附加微光助视已是有害无利。因此,需要关注:微光夜视仪达到饱和工作状态所对应的照度值是多少。对指定型号的微光夜视仪,这个数值需要通过实测取得。

观察距离是衡量微光夜视仪整体性能的重要指标。一般而言,讨论视距时,均有一定的前提条件,如环境照度、目标性质(种类、形体尺寸)等,只要确定了环境条件,确定了特定的仪器,对一定性质目标的观察距离就是一定的,即在特定条件下,微光夜视仪的观察距离及观察效果有一极限值。辅以微光助视只能在微光夜视仪的极限探测效果范围内改善探测效果,若探测效果以视距衡量,微光助视不可能无限增加视距。微光助视的作用主要体现在,通过改善景物反射辐射光谱与光电阴极光谱响应的匹配程度,

增大目标背景的初始对比度和提高景物的照度等，使微光夜视仪处于正常工作直至最佳工作状态。

3 特征参量定义及表征

从上述微光助视在3种场合下的应用效能分析，可知微光助视的实质是：夜天环境下，微光夜视仪捕获不到足够数量光子，处于不正常或不理想工作状态时，通过微光助视，使其达到理想工作状态从而显示出便于判读的清晰明亮的景物图像。3种应用场合中所共同关注的问题就是要定量给出不同夜天光辐照条件下，微光助视所需要附加的照度值。实际应用时，附加了这个照度值，会有利于使微光夜视仪在不同的夜天环境下处于正常的工作状态。

为增强微光助视效能，定义以下4个特征参量：

①标准(10^{-5} lx环境)微光助视照度值 E_m ；②星光下(10^{-3} lx环境)微光助视照度值 E_x ；③月光下(10^{-1} lx环境)微光助视照度值 E_y 。上述3个特征参量均为在特定的环境照度下，附加微光助视光源使微光夜视仪观察到设计要求的发现视觉等级所需要的照度值。④微光助视饱和照度值 E_b ： 10^{-1} lx环境下，附加微光助视光源使微光夜视仪刚好达到饱和状态所需要的照度值。

4个特征量均需在暗室内测定，实验原理如图2所示。使用积分球产生色温为2850 K的标准A光源模拟夜天光，调整积分球，使标准靶的照度分别为 10^{-5} lx、 10^{-3} lx、 10^{-1} lx[通过KZD-5微照度计(最低量程 10^{-1} lx)测量照度]，依次在燃烧塔内释放红外照明，通过特定的取光装置实现辐射通量连续可调、靶面照度均匀，通过微光夜视仪观察在辐射源照射下的标准靶条纹，达到最佳工作状态(可清晰观察到标准靶的条纹宽度)，测定特征参量 E_m 、 E_x 、 E_y 分别为 1.5×10^{-1} lx、 1.5×10^{-1} lx、 0.4×10^{-1} lx。以微

光增视辐射照射标准靶，调整辐射通量大小，使微光夜视仪达到饱和状态(观测效果恶化的临界点)，测出此时靶面照度值 E_b 为 2.4×10^0 lx。

实验表明，以这4个特征参量做指导，在不同夜天气象条件下实施微光助视，可使微光助视仪获得高效、稳定的观察效果。此外，这4个特征参数，对研究微光助视技术所涉及的问题，如药剂研制、弹丸装药设计、微光助视区域的计算、弹丸空中开伞位置选择等，均具有重要的参考价值。

如图3是无月晴朗星空气象条件下，在靶场使用某型号瞄准微光镜实拍的2幅照片。微光助视前地面实测照度值是 0.6×10^{-3} lx，此时，微光夜视仪所观察到的目标景物图像极不清晰，屏幕产生大量的雪花点，看不清靶板上“十”条纹，靶板周围有模糊的影子在移动，不能分辨出是什么物体在移动。依据室内测试特征参量 E_x 的数据，调整红外照明弹空中开伞位置及微光助视区域，微光助视后使地面实测照度值达到 1.42×10^{-1} lx，此时，不仅识别到靶板及靶板周围场景和人的走动，还观察到了1200 m处的小房屋和1400 m处的山岳形貌。

4 结论

1) 微光助视的功能是：不同夜天气象条件下，通过人工辅助“照明”，使微光夜视仪达到设计规定的正常工作状态，获得清晰明亮的景物图像。对于以往“红外照明可以使微光夜视仪提高观察距离4~7倍”的说法，基于视距探测方程及微光助视效能分析，推导不出合理的数学关系，不宜作为衡量助视效能的技术指标。

2) 在地面照度值为 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ lx的夜天气象条件下，合理附加微光助视特征参量 E_m 、 E_x 、 E_y ，实施微光助视，将会有效提高微光夜视仪观察的视觉等

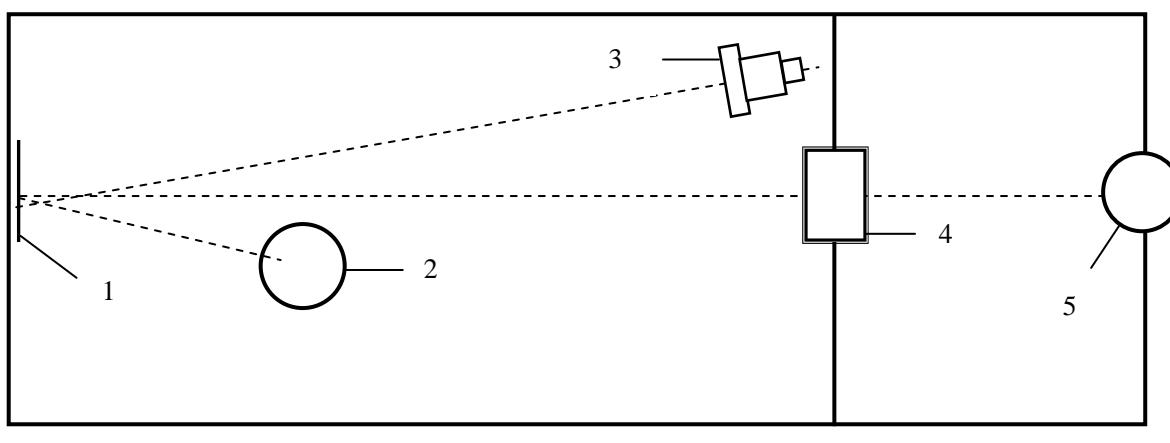


图2 微光助视特征参量测定原理示意图 Fig.2 Characteristic parameters measurement principle schematic diagram of twilight aids

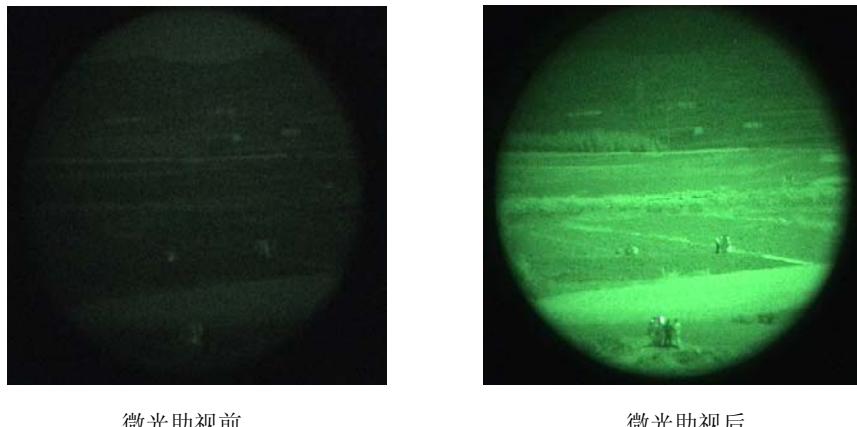


图3 无月晴朗星空时的观察效果图

Fig.3 Observation effect pictures under no moon sunny sky

级。靶场实验表明:当夜天光照度为 0.6×10^{-3} lx 时,微光夜视仪难以获得清晰的景物图像,在微光夜视仪的视场区域,通过红外照明,施加特征参量 E_x 后,微光夜视仪处于较理想的工作状态。

3) 本文定义及表征的 4 个特征参量: E_m 、 E_x 、 E_y 、 E_b , 对研究微光助视技术所涉及的问题,如药剂研制,弹丸装药设计,微光助视区域的计算,微光助视弹丸空中开伞位置选择等,均具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Richards E A. Limitations in optical imaging devices at low light levels[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10): 1999-2005.
- [2] 蔡珂珺, 付跃刚, 顾平平. 用于微光夜视仪性能检测的夜间仿真环境[J]. 红外技术, 2007, **29**(2): 102-106.
- [3] 邹永星, 周仁魁, 杨松龄. 基于超二代像增强器的微光夜视仪设计[J]. 红外技术, 2005, **27**(6): 18-22.
- [4] 刘长城. 新概念照明弹药-隐身红外照明弹[J]. 现代军事, 1993(1/2): 16-17.
- [5] 刘文哲. 微光增视的效能评价及与测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [6] 狄慧鸽, 赵爽, 钱芸生. 亮度增益对夜视仪视距的影响[J]. 红外技术, 2004, **26**(6): 27-30.
- [7] 张世杰, 吴定煥, 樊琨. 微光增视剂的辐射能量及光谱特性研究[J]. 火工品, 2010(5): 10-14.
- [8] 秦建飞, 蔡云骥, 杨高峰. 基于微光夜视系统总分辨率的目标探测概
- 率计算[J]. 解放军理工大学学报, 2011, **12**(3): 264-267.
- [9] 乔小晶, 彭晨光, 苗艳玲. 氧化剂成分和可燃剂含量对红外照明剂性能的影响[J]. 北京理工大学学报, 2012, **32**(2): 160-164.
- [10] 王勇. 微光增视特征与效能应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [11] Dillehay D R, Turner D W. Infrared illuminating composition [P]. USA, 5587552. 1996.
- [12] 张鸣平, 张敬贤, 李玉丹. 夜视系统[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [13] 周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [14] Richards E A. Fundamental limitations in the low light level performance of direct-view image intensifier systems [J]. *Infrared Physics*, 1968, **8**(1): 101-115.
- [15] 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.
- [16] 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): 761-764.
- [17] 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.
- [18] 刘磊. 激光助视/微光夜视系统视距评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005: 88-144.
- [19] 狄慧鸽, 钱芸生, 赵爽. 微光夜视系统在激光助视下的视距研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(10): 1357-1360.
- [20] 刘伟, 付江涛, 常本康. 激光助视下微光夜视仪光谱响应和视距分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 312-315.
- [21] 狄慧鸽. 激光助视/微光夜间驾驶技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.