

文章编号: 1002-2082(2006)06-0546-06

用于微光夜视系统性能评估的新方法

刘 磊, 李 元, 钱芸生, 常本康

(南京理工大学 电光院, 南京 210094)

摘 要: 为了全面、科学、合理地评价夜视系统的性能指标和作战效能,避免在野外实测微光夜视仪的过程中投入大量的人力、物力和财力,在微光成像夜视系统阈值探测理论和视景仿真技术的基础上,开发了一个集计算和仿真功能于一体的应用软件,提出了采用三维视景仿真软件作为夜视系统性能评估工具的新方法。该软件可以实现对微光夜视系统夜间成像的仿真和视距的评估。以三代微光夜视观瞄系统为试验对象,对其在不同夜间环境下进行了性能评估和野外测试。通过对结果的分析比较,证实了该评估方法是实用的。

关键词: 视距探测方程;视景仿真;性能评估

中图分类号: TN223

文献标志码: A

New method for visual range evaluation and scene simulation of low-light-level (LLL) night vision systems

LIU Lei, LI Yuan, QIAN Yun-sheng, CHANG Ben-kang

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to properly evaluate the performance and efficacy of night vision systems and save the test resource, a new method, in which a software of VC++-Creator-Vega is taken as a tool for performance evaluation of LLL night vision system, is put forward based on the threshold detection theory and the scene simulation technology of LLL night vision systems. The experiments on a LLL night vision system with Gen III intensifier were carried out under the specific circumstances. The viewing distance was estimated and simulated by the software. The comparison between theoretical data and the experimental data was made. The result proves that the performance evaluation software is effective and the system design is feasible.

Key words: viewing-distance detection equation; scene simulation; performance evaluation

引言

在评估微光夜视系统时,通常根据经典的阈值探测理论,分析微光夜视系统各参数对视距的影响,再利用设计者的经验对结果进行修正。这是一种比较有效的方法,但是它存在比较抽象的缺点,而且需要进行大量野外实地试验验证,既费钱又费

时,而且不能经历各种可能的应用场合。据此,我们提出了采用三维视景仿真软件作为夜视系统性能评估工具的新方法,利用计算机软硬件系统,开发了微光夜视仪视距评估和视景仿真软件,能够模拟各种天空背景辐射、气候、光照等条件,为夜间目标探测提供指定条件下的仿真场景,从而可以直观和

收稿日期: 2006-05-22; 修回日期: 2006-07-05

获奖项目: 国家兵器工业集团科技进步三等奖

作者简介: 刘磊(1978-),女,博士,安徽阜阳人,南京理工大学电子工程与光电技术学院讲师,主要从事微光和红外材料、器件及系统研究。E-mail: liu1133_cn@sina.com.cn

逼真地仿真其性能,同时还可以通过该软件分析、验证和修正微光夜视系统视距理论,调整系统参数,为整个微光夜视系统的设计提供依据。

1 视距评估软件

视距评估软件建立在修正后的视距理论公式的基础上^[1-2]:

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

$$R_L = \frac{f'_o A_k H_t}{N_e}$$

式中: D 为物镜的直径(mm); τ_0 为物镜的透过率; E_0 为夜天空照度(lx); F_Φ 为像增强器的噪声功率因子; C_0 为初始对比度; 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; S_A 为光电阴极的积分灵敏度($\mu A/lm$); Φ_{\min} 为阈值信噪比; t 为系统积累时间; $\bar{\rho}$ 为景物的平均反射率; τ_d 为大气透过率; ε 为目标长宽比; α_λ 是标准光源转换到对景物反射辐射的光谱转换系数; $\beta(G)$ 为亮度增益修正系数; f'_o 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空间频率; A_k 为系统分辨率; R 为视距。

我们选用 Visual C++ 6.0 为编程语言,结合三维视景仿真开发工具 Creator 和 Vega 来设计软件,整个软件系统具有友好的人机交互界面,对系统的各种操作和设置采用菜单式控制。基本界面如图 1 所示。微光夜视系统视距评估软件主要包括 3 大功能模块:视距估算功能模块、系统设计分析模块和视景仿真功能模块。

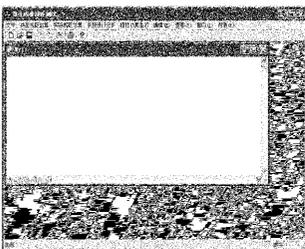


图 1 视距估算及视景仿真软件基本框架

Fig. 1 The interface of performance simulation software of LLL night vision system

1.1 视距估算功能模块

在视距估算功能模块中,选择“典型视距估算”菜单,包括“参数设置”,“参数曲线”和“估算结果”3 个下拉菜单,可以对满月光和晴朗星光 2 种环境,人和车辆 2 种目标,绿色草木和粗糙混凝土 2 种背景下的微光夜视仪的视距进行估算,如图 2 所示。

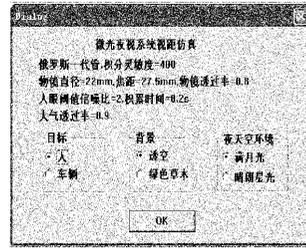


图 2 典型视距估算“参数设置”对话框

Fig. 2 The “parameters setting” dialog of typical viewing-distance evaluation

选择“实际视距估算”菜单,点击“参数设置”,将出现如图 3 所示对话框,根据实际情况将各个参数输入计算机,然后选择“参数计算”菜单,完成包括景物的反射系数、初始对比度、光电阴极与景物的光谱匹配系数等光谱量参数的计算。选择“曲线显示”菜单可以显示出相应光谱量参数的曲线,如图 4 所示。最后点击“视距结果”菜单就得到最终的视距估算结果报告,根据需要保存估算结果。



图 3 实际视距估算“参数设置”对话框

Fig. 3 The “parameters setting” dialog of actual viewing-distance evaluation

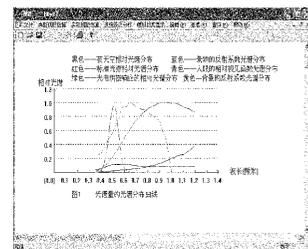


图 4 光谱量参数的曲线显示

Fig. 4 The curve of spectral parameters

1.2 系统设计分析模块

选择“系统设计分析”菜单,包括“曲线显示”和“设计分析”2 个部分,可以显示视距与系统参数的关系曲线,例如视距和物镜、视距和像管的信噪比、增益以及 MTF 等参数曲线,如图 5 所示。通过对曲线的分析和比较,可以对参数做出调整,得到相应

的视距结果,这实际上是一个反馈过程,可以直观快捷地解决系统设计中的参数优化问题,指导系统的设计。

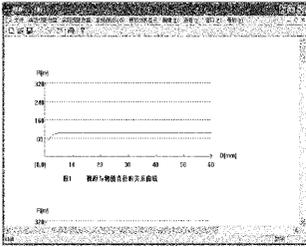


图5 分析设计中视距与系统参数关系曲线

Fig. 5 System parameters vs viewing-distance

1.3 模拟仿真功能模块

模拟仿真功能模块最终嵌入到系统软件中,它主要由“仪器设置”、“场景设置”、“模拟仿真”和“录像回放”4个部分组成,如图6所示。

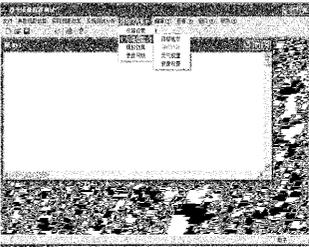


图6 模拟仿真功能模块

Fig. 6 The simulation module

1.3.1 工作流程

首先进行光电阴极的选择,点击“仪器设置”可以调出典型的像增强器光电阴极的其他参数^[3-4]。

接着选择“场景设置”,包括目标和地形、路线和速度、天气以及录像设置。在仿真程序运行之前,需要对这几项参数进行设置,同时程序会对参数的有效性进行检查,当发现错误后会提示出错信息。

“目标和地形设置”主要针对仿真场景的目标和地形进行设置(如图7所示)。根据设计,共有直升机(2种)、坦克、轻型装甲车(2种)、军用运输车(2种)、固定目标(3种)等10种目标设置;地形则共有城市、小城镇、平原、沙漠、丘陵、山地海边、河边和海边等8块地形。这些目标和地形已经用三维建模工具Multigen Creator进行建模,并且用三维仿真软件Vega中“Texture Material Mapper”工具对模型中所用的各种纹理特性进行了详细设置,存放在后缀为adf的文件中。这一文件对整个图形环境、虚拟环境和数据库组件等都有一个完整的定义,而这些定义会在视景仿真程序里面使用,构成

程序运行时的初始设置。为了简化程序代码,部分地形和目标已经静态加载在.adf文件中,也可以在程序中动态地调入不同目标文件,使得仿真程序的设定更加灵活。



图7 目标和地形设置界面

Fig. 7 The interface of target and terrain setting

“速度设置”是设置目标的速度,如图8所示。根据战术指标的要求,直升机的运动速度为0~720 km/h,地面运动目标的速度为0~80 km/h。速



图8 路线和速度设置界面

Fig. 8 The interface of path and velocity setting

度由程序动态控制。“路线设置”分为固定路线和随机路线。固定路线在对我军直升机和装甲部队进行充分调研的基础上确定,可以将目标经典的路线科目设置在其中。设置为随机路线时,操作者事先不知道目标行进路线,但路线也必须符合实际情况。战术队形分为“并行前行”、“纵队前行”和“战术列队”等3种队形。目标数量默认值是3,一般进行视距测定时,把目标数量调整为1。

“天气设置”设置试验的时间和天气,如图9所示。时间在0~24小时之间可调,气候有雾、雨和雪等。“天气设置”中所有的设置都采用动态加载的方式。“时间设置”从0点到24点,默认状态下为上午

9点,设置不同的时间在程序中表现为整个场景的亮度强弱。雾的设置主要影响到场景中的能见度,默认值为20 000 m,即在20 000 m以后就因为雾的浓度问题将无法看见,而在0~20 000 m的范围内,可以在程序中设定雾的分布情况,一般设定为线性,即雾浓度与距离成反比。

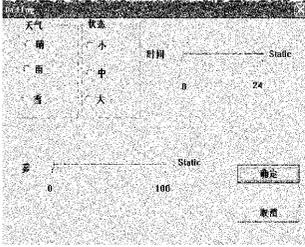


图9 天气设置界面

Fig. 9 The interface of weather setting

“录像设置”可以完成对仿真过程的录像文件路径设置,如图10所示。



图10 录像设置界面

Fig. 10 The interface of recorder setting

至此完成参数设置,这些参数将全部存入文档类中供仿真线程使用,然后点击“模拟仿真”菜单,就开始按照设定值进行初始化,启动仿真程序,开始仿真。初始化时,调用 Vega 中的 Mosart Atmospheric Tool 工具,根据所设定的日期、时间、所在经纬度和大气云层对大气辐射特性进行自动计算;用 Vega 中的“Sensor Effect”模块对夜视系统的增益、噪声和荧光屏显示色等参数进行模拟,可以根据所用像管特性建立不同噪声模型;用 Vega 中的“Sensor”模块,对光电阴极的光谱特性等参数进行设置,包括积分灵敏度、光谱响应曲线

等;用“Channel”模块对夜视仪的视场进行模拟;用“Environments”模块对时间和气候进行仿真,以完成整个仿真场景的搭建^[5-6]。

在仿真过程中,屏幕上首先出现所选地形的整个场景,已经附加上了夜天天气、时间以及背景等环境效果。随着程序的运行,所选目标出现,即按照一定的运动速度和运动路线进入微光夜视仪的视场内,观察者可以通过键盘或者鼠标的调整来模拟微光夜视仪的观察角度,使观察物镜对准目标,开始进行观察。仿真软件根据设定好的大气、目标、背景以及微光夜视仪的参数,利用辐射强度公式计算出最终进入到微光夜视仪接收光敏面上的辐射强度,以便调整图像灰度等级,模拟出目标从被发现,逐渐清晰,识别直至看清的观察效果。从屏幕上看到的图像,就是试验者从微光夜视仪目镜或者微光电视上看到的观察结果。在观察图像的同时,屏幕右上角显示目标到观察者的距离,这个距离通过测距模块来确定,与真实工作状态下一致,对应实际试验过程中试验员判断最终能够发现、识别或者看清时用激光测距机测出的距离,最终作为微光夜视仪各个探测概率上的视距。

对于静态目标,通常先设定目标离观察者的一个距离,然后将微光夜视仪相对于目标慢慢拉近,加大距离,直到看不清楚为止,即是探测器的最大探测距离;或者调整夜视仪的参数,如果观察者看到屏幕像已经无法分辨,则利用此时的屏幕图像分辨率,通过参数转换关系,得出微光夜视仪的系统分辨率,然后转换为距离,也就是微光夜视仪的视距。

2 三代微光夜视观瞄系统视距评估及试验

以三代微光夜视观瞄系统为研究对象,我们对其在不同夜间环境下的视距进行了评估和野外试验测试。

参加试验的三代微光器件主要参数见表1。试验静态目标为直径为2.5 m的气球,动态目标为歼八飞机。试验分为2项进行。首先进行动态目标观察试验,利用飞机或巡航导弹空中离远飞行或临近飞行,测试被试品在夜间对这些空中目标的发现和识别距离,照度如表2所示,视距结果如表3所示。

表1 参试仪器典型参数

Table 1 Typical parameters of the instrument

仪器名称	视场/(°)	重量/kg	灵敏度/($\mu\text{A}/\text{Lm}$)	分辨率/(lp/mm)	信噪比	焦距/mm	直径/mm	透过程
微光电视 A	3.2	10.5	780	36		320	160	
微光电视 B	3.75	23	700	58	23.8	300	180	0.8

表2 动态试验照度

Table 2 The illuminance of the dynamic experiment

时间	航次	照度	温度	湿度
20:12	1架1航	$3.2 \times 10^{-3} \text{lx}$	21 C	67%
	1架2航	$1.8 \times 10^{-3} \text{lx}$	21 C	67%
	1架3航	$1.38 \times 10^{-3} \text{lx}$	21 C	68%
	1架4航	$1.25 \times 10^{-3} \text{lx}$	21 C	68%
22:05	2架1航	$1.11 \times 10^{-3} \text{lx}$	20 C	70%
	2架2航	$1.08 \times 10^{-3} \text{lx}$	20 C	70%
	2架3航	$1.07 \times 10^{-3} \text{lx}$	20 C	70%

表3 动态试验记录表

Table 3 The recorded data of the dynamic experiment

仪器 微光电视 A			
目标	飞机	速度	720 km/h(地速)
高度	1 800 m	航路捷径	1 000 m
照度	$1.25 \times 10^{-3} \text{lx}$	能见度	10 km
气温	21 C	湿度	68%
观察距离		观察结果	
15 000 m		开灯尾追发现	

其次,利用气球等物体模拟静态目标,测试被试品在夜间对空中目标的发现和识别距离,分别在夜间和有照明炬的情况下进行,照度条件见表4。战士拉着绳子慢慢放气球升空,试验结束后,测量绳长为154 m,约为160 m。绳子与地面约成45°,则气球高度约为113 m。表5给出了试验结果。

表4 静态试验照度

Table 4 The illuminance of the static experiment

时间	照度	湿度	温度
21:00	$4.5 \times 10^{-3} \text{lx}$	40%	19.5 C
21:40 (试验开始) (7.7 km 处)	对气球: $2.8 \times 10^{-3} \text{lx}$	45%	16.5 C
22:37 (8.4 km 处)	对气球: $2.2 \times 10^{-3} \text{lx}$ 对空: $3.7 \times 10^{-3} \text{lx}$	47%	16.5 C
第二个照明炬	对气球: $2.3 \times 10^{-3} \text{lx}$	47%	15.5 C
第二个照明炬	对气球: $2.3 \times 10^{-3} \text{lx}$ 无照明炬: $2.1 \times 10^{-3} \text{lx}$	47%	15.5 C

我们利用视距估算软件对仪器观察静态和动态目标的视距进行估算,以与实测值进行比较^[7-8]。在晴朗星光下,天空照度为0.002 3 lx,大气透过

表5 静态试验记录表

Table 5 The recorded data of the static experiment

仪器 微光电视 A			
目标	直径2.5 m 气球	风速	3~5 级
湿度	45%~47%	风向	偏北
照度	$2.2 \times 10^{-3} \text{lx}$	能见度	>10 km
气温	16.5 C~15.5 C	高度	138 m
距离	观察结果		
6 900 m	光照气球	可见	
	没有光照气球	可见	
7 700 m	光照气球	可见	
	没有光照气球	隐约可见	
8 400 m	光照气球	隐约可见	
	没有光照气球	不可见	
9 600 m	第二次打照明炬	可见	
	第三次打照明炬	不可见	
	无照明炬	均不可见	

率定为0.9;景物选择为透空背景和目标为2.5 m的气球;微光电视A和B的参数已定;人眼阈值信噪比在1~2的范围内(已令人满意),从严考虑取为2;人眼积累时间定为0.2 s;目标短边尺寸为2.5 m(即气球的直径);目标长宽比为4。观察水平确定为概率为60%~100%的识别水平,估算结果如表6所示。

表6 视距估算结果

Table 6 The results of viewing-distance evaluation

估算结果/m	微光电视 A	微光电视 B
$2.2 \times 10^{-3} \text{lx}$, 2.5 m 气球	7 979	7 743
$6.3 \times 10^{-3} \text{lx}$, 歼八飞机	12 879	12 074

以微光电视A为例,其理论视距静态试验为7 979 m,实测值8 400 m左右(隐约可见);动态试验为12 879 m,实测值15 000 m左右(开灯尾追飞机发现)。通过视距实测值与理论值的比较,发现两者有一定的误差,但由于野外环境复杂,误差在合理范围内,达到了三代微光器件预期指标。

再应用所编制的软件对其进行微光成像视景仿真。图11和图12分别为对空中目标和地面目标观察的仿真效果。

为了方便地追踪目标,定义键盘L键将目标锁定在屏幕中央,定义P键暂停目标的运动,同时屏幕右上角显示的为目标到观察者的距离。在仿真过程中主要参数调节为1—时间;2—增益;3—视场;4—噪声;5—光谱响应。这里把噪声因子取0.05,传递因子取0.5,大气数据库选用晴朗星光,

背景照度为 $10^{-7} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, 显示器可视区域宽度 310 mm, 分辨率 1024×768 。为了达到实时仿真的目的, 采取多种图形处理技术, 在保证场景逼真度的同时, 确保了仿真场景运行时能达到每秒 30 帧以上, 实现了帧与帧之间的平滑切换。

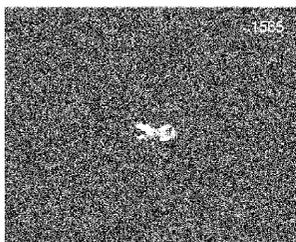


图 11 空中目标仿真效果

Fig. 11 The simulation scene of the plane

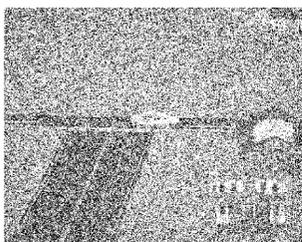


图 12 地面目标仿真效果

Fig. 12 The simulation scene of the ground target

通过与微光夜视仪试验观察效果的对比, 发现本系统的仿真场景与夜视仪实际观察场景非常相似。在对某些参数进行微调以后, 可以达到更加接近的效果。

3 结论

本文通过评估软件, 对视距进行了估算, 并仿真出了在各种参数条件下的三代微光夜视仪的成像效果, 使设计者可以全面直观地对微光夜视仪的性能进行评估。经过多次应用, 本评估软件性能稳定, 方便实用, 估算和仿真效果达到了预期的目标, 因此对野外试验有一定的帮助, 也为微光夜视系统设计提供了参考依据。

参考文献:

[1] 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 Ben-kang. The revised formula for visual range of low light level imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23 (6): 761-765. (in Chinese)

[2] LIU Lei, CHANG Ben-kang. New apparent distance-detecting equation for low-light-level imaging system [J]. Optical Engineering, 2004, 43(2): 415-419.

[3] 周斌, 刘秉琦, 满波. 微光像增强器图像传递信噪比的测试研究 [J]. 应用光学, 2004, 25(5): 60-61.

ZHOU Bin, LIU Bing-qi, MAN Bo. Research on testing image transfer signal-to-noise ratio of image intensifier [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25 (5): 60-61. (in Chinese)

[4] 徐江涛, 张兴社. 微光像增强器的最新发展动向 [J]. 应用光学, 2005, 26(2): 21-23.

XU Jiang-tao, ZHANG Xing-she. The latest development of low-light-level image intensifier [J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26 (2): 21-23. (in Chinese)

[5] 钱芸生, 刘磊, 李元, 等. 基于 Vega 的微光夜视系统性能仿真技术研究 [J]. 红外技术, 2004, 26(4): 61-64.

QIAN Yun-sheng, LIU Lei, LI Yuan, et al. Performance simulation of LLL night vision system based on Vega [J]. Infrared Technology, 2004, 26 (4): 61-64. (in Chinese)

[6] 肖志峰. 模拟训练器 Vega 视景仿真系统开发 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003.

XIAO Zhi-feng. The develop of a virtual simulation system for military training [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)

[7] 刘磊, 常本康. 微光夜间驾驶仪探测距离研究 [J]. 兵工学报, 2003, 24(3): 342-346.

LIU Lei, CHANG Ben-kang. The visual range of LLL night vision goggle for drive [J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(3): 342-346. (in Chinese)

[8] 刘磊. 激光助视/微光夜视系统视距评估及其应用 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

LIU Lei. Visual range evaluation of LLL night vision system with laser illuminator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)