

可见光成像系统作用距离试验方案设计及评估

付兴领 兰卫华 汪江华 刘玉 潘晓东

中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023

摘要 从分辨率、对比度、照度三个因素出发,根据指标要求,详细制定了可见光成像系统作用距离测试方案。在试验中,为了满足目标作用距离 20 km 的要求,将考核目标等效为 4.5 km 远的等效目标大小;在实际的 11 km 大气能见度条件下,将考核照度和对比度转换为试验目标目标值。在目标照度不小于 300 lux 的环境下,可见光成像系统能够识别对比度大于 0.253 的考核目标;在考核目标对比度为 0.2~0.253, 300 lux 低照度时,目标是不能确认的。通过对试验结果进一步图像处理发现,目标靶标是可分辨的。试验结果表明,系统设计满足指标要求。

关键词 图像处理;可见光成像系统;作用距离;能见度

中图分类号 V271.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.031002

Design of Experiment and Result Evaluation for Detection Range of Visible Imaging System

Fu Xingling Lan Weihua Wang Jianghua Liu Yu Pan Xiaodong

*Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China,
Luoyang, Henan 471023, China*

Abstract An experiment is designed to validate the visible imaging system's performance through analyzing the effects of resolution, contrast and the illumination. The effective targets at a distance of about 4.5 km are tested instead of 20 km. Under conditions of 11 km visibility, the equivalent detection range is figured out by means of contrast and illumination. If the target's illumination is not less than 300 lux, the system can identify the target with 0.253 contrast, but it is not sure when the contrast is between 0.2 and 0.253. With special image processing, the result is significantly improved. Experimental results show that the system's performance can meet the special requirements.

Key words image processing; visible imaging system; detection range; visibility

OCIS codes 100.2980; 040.1520; 110.2970; 040.1880

1 引言

光电技术在军民应用方面的研究越来越广泛^[1-2],其应用形式也多种多样^[3]。军用上,在目标跟踪、侦查、瞄准等领域发展迅速^[4];在电力巡线、环保检测等民用方面^[5]以及生产、检测等工业方面^[6],光电技术得到了长足发展,并且在救援救灾^[7]等方面发挥着越来越大的作用。可见光成像系统作为光电技术的重要组件,其作用距离是重要的战术指标。

可见光成像系统的作用距离是指满足光电系统搜索、发现、识别目标等使用需求的最大距离^[8]。实际作用距离的考核需要通过应用环境的试验验证,需要投入大量的时间、人力、物力。研究可见光成像系统作用距离,对于快速隔离可见光成像系统性能影响因素、评估作用距离,具有重要的现实意义。为了模拟研制的可见光成像系统作用距离,本文通过分析某型可见光成像系统作用距离的影响因素,制定模拟试验方案,采用地面试验模拟应用环境条件来验证性能指标,并通过后期的图像处理,评估可见光成像系统的作用距离。

收稿日期: 2013-10-12; 收到修改稿日期: 2013-11-29; 网络出版日期: 2014-02-19

作者简介: 付兴领(1985—),男,硕士,工程师,主要从事光学机精密机械及总体设计技术等方面的研究。

E-mail: fxlnpu@gmail.com

2 试验方案分析

2.1 考核要求简化

可见光成像系统作用距离的考核目标特性要求如表 1 所示。

表 1 考核目标特性表

Table 1 Target parameters

Target size /m	Target contrast	Target minimal illumination /lux	Target assessment distance /km
3.57	0.2	300	20

2.2 影响因素分析

影响可见光成像系统作用距离的三个因素^[9]如图 1 所示。

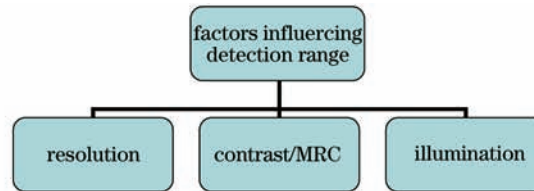


图 1 作用距离影响因素图

Fig.1 Factors influencing detection range

对于要求一定识别作用距离的系统,要分辨目标,需要传感器识别的极限目标尺寸小于考核目标尺寸,传感器响应的极限对比度[最小可分辨对比度(MRC)]小于目标与背景亮度比即对比度条件,传感器响应的极限照度相应地要小于要求环境照度。

上述条件同时满足时,可见光成像系统合格与否才能被充分地考核。

3 试验方案

不同目标等效考核时,要充分考虑大气能见度的影响和大气透射率的传递,保证目标传递至成像系统时指标一致。对于同一套可见光成像系统,通过将考核目标的作用距离与考核因素折算为试验距离与试验目标进行考察,如图 2 所示。

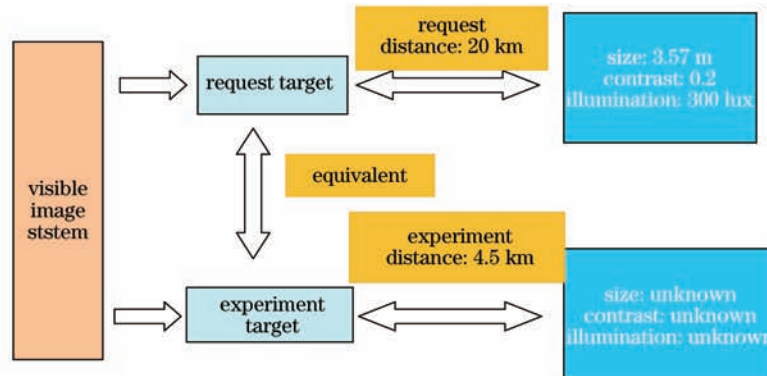


图 2 试验方案图

Fig.2 Schematic of experiment design

3.1 靶标大小选择

可见光成像系统作用距离与光学系统焦距、电视线、CCD 特性等成像系统自身因素以及目标高度、所占电视线等目标特性因素有关^[10]:

$$R = f'HN/hn, \quad (1)$$

式中 R 为作用距离,单位 m; f' 为光学系统焦距,单位 mm; H 为目标高度,单位 m; N 为电视线数; h 为 CCD 探测面宽,单位为 mm; n 为像所占电视线数,按照约翰逊准则来确定。

对于同一套可见光成像系统,由(1)式可知,识别目标大小为

$$H_{T_2} = R_{T_2} \times H_{T_1} / R_{T_1} = 4.5 \times 3.57 / 20 \approx 0.8 \text{ (m)}. \quad (2)$$

式中 H_{T_2} , H_{T_1} 分别指考核目标、模拟目标的目标高度, R_{T_2} , R_{T_1} 分别指考核目标、模拟目标的作用距离。

根据光电探测系统作用距离和识别指标要求,由约翰逊准则,用目标等效条带图案可分辨力来确定成像系统对目标的识别作用距离能力。在50%概率时各探测水平如下:探测/发现, 1.0 ± 0.25 lp;定向, 1.4 ± 0.35 lp;识别, 4.0 ± 0.8 lp。

本文中讨论识别距离,故最小分辨靶标的目标线宽度为0.1 m。

3.2 靶标对比度选择

可见光成像系统在屏幕上图像的清晰度取决于目标的对比度^[11]。目标传递的信号对比度最终要满足大于人眼极限分辨的要求,其传递过程如图3所示,目标对比度在传递过程中会逐级损耗,其光学信息经过大气、光学系统、记录介质、人眼等串联系统的各个环节,每个环节对不同的空间频率信息有不同的响应程度,最终目标信息由人眼感知。

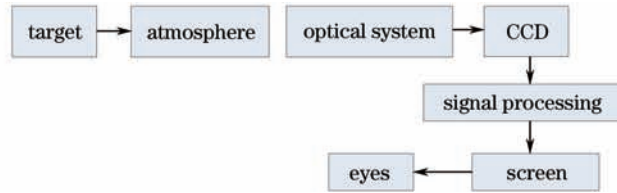


图3 可见光成像系统光学串联示意图

Fig.3 Diagram of light transmission for visible imaging system

$$M_s = M_T \cdot \tau_{at} \cdot M_{opt} \cdot M_{CCD} \quad (3)$$

式中 M_s 为传递到人眼的对比度, M_T 为目标的对比度, τ_{at} 为大气射透率, M_{opt} 为光学系统衰减系数, M_{CCD} 为 CCD 系统衰减系数。

对于同一套可见光成像系统,光学系统后端的传递损耗是一致的,故由(3)式可知,

$$\begin{cases} M_{T1} \times \tau_{at1} = M_{T2} \times \tau_{at2} \\ M_{T2} = \frac{M_{T1} \times \tau_{at1}}{\tau_{at2}} \end{cases} \quad (4)$$

由此可知,不同对比度目标传递到成像系统前端的与大气透射率密切相关,需要考虑试验条件来确定。

3.3 靶标照度选择

可见光成像系统与目标光能量指标密切相关。目标背景反射、大气传输过程中的衰减、光学系统传播的吸收、反射损失等因素,使得目标光能量的传播逐级递减,传递到传感器靶面的响应照度为

$$E = \frac{1}{4} E_0 \rho \tau_{at} \tau_0 \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \quad (5)$$

式中 E_0 为工作照度, ρ 为目标反射率, τ_0 为光学系统透射率, D/f' 为可见光成像系统相对孔径。

对于同一套可见光成像系统,由(5)式可知,

$$\begin{cases} E_{0T1} \rho_{T1} \tau_{at1} = E_{0T2} \rho_{T2} \tau_{at2} \\ E_{0T2} = E_{0T1} \rho_{T1} \tau_{at1} / (\rho_{T2} \tau_{at2}) \end{cases} \quad (6)$$

4 试验条件及过程

4.1 试验条件

由前文可知,试验目标的靶标对比度与试验气候条件的大气透射率密切相关。通过大气能见度计算大气透射率,根据 LOWTRAN7 软件计算大气透射率^[12],设定当地试验条件以及测试作用距离参数,即可得出大气透射率。

考核目标为高空中的某型银灰色喷涂飞机,其表面反射率 $\rho_{T1} = 0.6$,根据作用距离考核条件,经过 LOWTRAN 的透射率计算,在工作波段的大气透射率 $\tau_{at1} = 0.6$,试验当天大气能见度为 11 km,同样经过 LOWTRAN 可得大气透射率 $\tau_{at2} = 0.253$,故等效靶板对比度及等效照度为

$$\begin{cases} M_{T2} = \frac{M_{T1} \times \tau_{at1}}{\tau_{at2}} = \frac{0.2 \times 0.6}{0.253} \approx 0.48 \\ E_{0T2} = E_{0T1} \rho_{T1} \tau_{at1} / (\rho_{T2} \tau_{at2}) = 300 \times 0.6 \times 0.6 / (\rho_{T2} \times 0.253) = 432 / \rho_{T2} \end{cases} \quad (7)$$

综上,经过等效条件,确定了等效试验目标特性,试验目标参数不大于等效参数,如表2所示。

表2 试验目标特性表

Table 2 Parameters for experiment

Size	Contrast	Minimal illumination	Assessment distance
0.1m	0.4	300	4.5KM

4.2 试验过程

试验目标为对比度可调节的一组靶标,如图4所示。

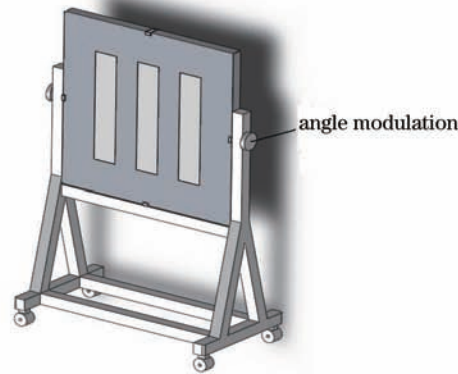


图4 靶标图

Fig.4 Figure of target

表3为靶标与识别距离的关系,选用1#靶时,可见光成像系统的作用距离达到4.47 km,即可考核20 km的作用距离,所以选择4.5 km的试验距离能充分模拟。当选用2#靶时,可见光成像系统的作用距离需达到6.26 km,才能考核20 km的作用距离,在4.5 km处识别此靶标,相当于考核14 km的作用距离。

表3 靶标与识别距离关系表

Table 3 Relation between target and distance

Target	Resolvable width /m	Imaging distance corresponding to 20 km equivalent detection range /km	Equivalent detection range for 4.5 km imaging distance /km
1#	0.10	4.47	20.13
2#	0.14	6.26	14

5 试验结果及后处理

5.1 试验结果

试验时的大气能见度非常低,可见光成像系统测试效果如图5所示。

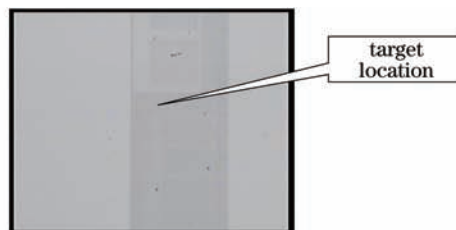


图5 可见光成像系统成像图

Fig.5 Image of visible imaging system

试验结果如表4所示,表中×表示不能识别目标,◇不能确认是否识别目标,◆表示确定识别目标。

由表4可知,照度为1000 lux时,能够识别对比度0.4的最小靶板,即在适当的亮度条件下,可见光成像系统满足识别对比度为0.2的考核目标,20 km的作用距离要求。对比度大于0.6时,最小靶板能识别出来,此时对应的目标的对比度为 $M_{i1} \times = \frac{M_{T2} \times \tau_{at2}}{\tau_{at1}} = \frac{0.6 \times 0.253}{0.6} = 0.253$,即在低于系统照度要求的300 lux的环境下,可见光成像系统不能够识别对比度小于0.253的考核目标,20 km的作用距离要求。在较低的大气

能见度下,低照度时,对比度大于0.4、小于0.6时,单帧静态图片显示不出来目标的清晰轮廓,但是在动态视频里能够识别此对比度下的目标,即可见光成像系统在识别20 km距离、对比度为0.2~0.253的考核目标时,如果照度较低、大气能见度不好,目标是不能确认的。

表4 1#靶实际等效识别距离表

Table 4 Test results of target 1#

Contrast	0.3	0.4	0.6	1.0
300 lux	×	◇	◇	◇
600 lux	×	◇	◆	◆
1000 lux	×	◆	◆	◆

5.2 试验后处理

图6、图7分别为相同对比度及照度下的试验结果对比图,其中左边图片是未经图像处理的原始效果图,右图为经过图像处理后可以分辨目标的效果图。由此可见,可见光成像系统本来可识别的目标,经过显示器传递到人眼后[(3)式],有可能不能被人眼识别(这里不对人眼成像的影响做具体分析),而图像经过处理后,如图6、图7右图所示,等效目标清晰可辨。所以,图像处理能提高人眼可识别的可见光成像系统作用距离。

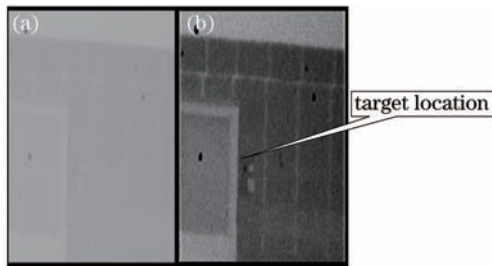


图6 图像处理前(a)后(b)0.4对比度、600 lux照度下试验结果对比图

Fig.6 Images of 0.4 contrast and 600 lux illumination before (a) and after (b) image processing

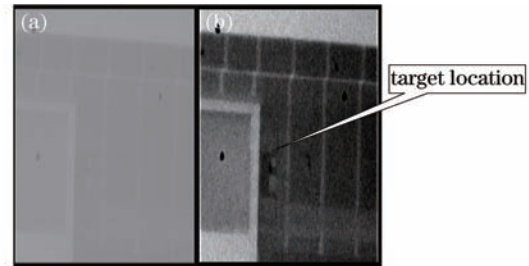


图7 图像处理前(a)后(b)0.4对比度、300 lux照度下试验结果对比图

Fig.7 Images of 0.4 contrast and 300 lux illumination before (a) and after (b) image processing

6 结 论

针对可见光成像系统作用距离的考核要求,从分辨率、对比度、照度三个影响因素进行了详细分解,将考核目标转换为等效目标考核,大大提高了系统作用距离测试的可操作性。在进行作用距离评估时,为了充分模拟考核目标,需要充分考虑分辨率、对比度、照度等效转换过程中的影响因素;在考核目标等效转换过程中,必须考虑试验气候的影响,当在复杂大气环境下进行等效处理时,应该充分考虑大气湍流等因素^[13]。试验结果充分说明了图像处理能显著提高人眼可识别的作用距离。

参 考 文 献

- Liu Yu. New application of electro-optical technology in light weapons[J]. J Applied Optics, 2006, 27(4): 289-292.
刘宇. 光电技术在轻武器中的新应用[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 289-292.
- Li Yunbo, Fang Zheng, Zhang Yonggang, *et al.*. Refraction effects on electro-optical target characteristic in near sea surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0401001.
李云波, 方正, 张永刚, 等. 近海面异常折射对光电探测目标特征的影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0401001.
- Gong Shunsheng, Cheng Xuewu, Li Faquan, *et al.*. Applications of atomic spectra filtering and atomic frequency discrimination in optoelectronic systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 042301.
龚顺生, 程学武, 李发泉, 等. 原子滤光及鉴频技术在光电探测中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 042301.
- Sun Longhe, Lu Guangshan. Research on the technology and development about detection, tracking and aiming of airborne optoelectronic pods[J]. J Electronics Optics & Control, 1995, (2): 1-10.
孙隆和, 卢广山. 机载光电探测、跟踪、瞄准系统技术分析及发展研究[J]. 电光与控制, 1995, (2): 1-10.

- 5 Li Wenkui, Wang Junpu, Jin Zhihua, *et al.*. Development and countermeasure of airborne optoelectronic pods[J]. *J Chinese Inertial Technology*, 2001, 12(5): 75-80.
李文魁, 王俊璞, 金志华, 等. 直升机机载光电吊舱的发展现状及对策[J]. *中国惯性技术学报*, 2001, 12(5): 75-80.
- 6 Zhang Ping, Tong Yala, Ouyang Guangyao, *et al.*. Detecting thermal flaw inner cylinder head based on infrared thermograph technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 111103.
张 萍, 童亚拉, 欧阳光耀, 等. 基于红外成像技术的缸盖热裂纹探测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 111103.
- 7 Yin Pengfei, Yin Qiu, Chen Xingfeng, *et al.*. Unmanned aerial vehicle aerial remote sensing techniques and its application on post-earthquake disaster investigation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 112802.
尹鹏飞, 尹 球, 陈兴峰, 等. 无人机遥感技术在灾后灾情调查中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(11): 112802.
- 8 Hu Zhaohui, Wang Kai, Che Qi, *et al.*. Simulation research on detection range of airborne electro-optical tracking system[J]. *J Detection & Control*, 2005, 27(4): 50-56.
胡朝晖, 汪 凯, 车 奇, 等. 机载光电跟踪系统作用距离建模与仿真[J]. *探测与控制学报*, 2005, 27(4): 50-56.
- 9 Wang Weiguo, Chen Tao, Zhang Tongshuang, *et al.*. The research for effective distance of TV system on a theodolite[J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2005, 26(suppl): 68-70.
王伟国, 陈 涛, 张同双, 等. 电视成像系统作用距离分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(suppl): 68-70.
- 10 Zhao Miaojuan, Che Hong. Analysis of the efficient distance of O-E system for military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(suppl): 501-503.
赵秒娟, 车 宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(suppl): 501-503.
- 11 Zhao Wencai. Research on effects of factors for detection range of TV system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2(5): 28-34.
赵文才. 影响电视作用距离的几个环节[J]. *光学精密工程*, 1994, 2(5): 28-34.
- 12 Meng Fanbin, Zheng Li. LOWTRAN7-based calculation method of IR transmittance in the atmosphere[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2009, 24(3): 29-32.
孟凡斌, 郑 丽. 基于LOWTRAN7的红外大气透过率计算方法[J]. *光电技术应用*, 2009, 24(3): 29-32.
- 13 Lu Chao, Yuan Renmin, Luo Tao, *et al.*. Characteristic scale analysis of atmospheric optical turbulence in simulating convective boundary layer with water tank[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0201002.
卢 超, 袁仁民, 罗 涛, 等. 模拟的对流边界层光学湍流的特征尺度分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0201002.