

# 基于等效照明的主动近红外成像系统性能评价

宋俊儒<sup>1</sup> 王 霞<sup>1</sup> 金伟其<sup>1</sup> 卢玉华<sup>2</sup> 刘荐轩<sup>2</sup> 李红升<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)  
<sup>2</sup> 公安部第一研究所检测中心, 北京 100048)

**摘要** 用于交通监控或区域安防监控的主动近红外摄像机是夜视系统的一个重要应用,作用距离是它重要的性能指标和进行系统设计的主要依据。针对主动近红外成像系统的设计与分析需要,提出一种用于评价主动近红外成像系统作用距离的方法,用于判定系统对给定距离上的目标的探测能力。该方法在利用大气传输理论计算主动照明光源在标称距离处目标上的辐照度分布的基础上,采用等效照明的原理实现了对辐照度分布的近距离模拟;结合约翰逊准则和成像理论评价了待测系统对标称距离处目标的探测能力。根据该方法对主动近红外摄像机进行了检测,并与室外实测结果进行了对比分析;检测方法适用于一般的光电成像系统。

**关键词** 成像系统;微光夜视;等效照明;主动近红外成像系统;作用距离评价方法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0311002

## Performance Evaluation Method of the Active Near-Infrared Imaging System Based on Equivalent Lighting

Song Junru<sup>1</sup> Wang Xia<sup>1</sup> Jin Weiqi<sup>1</sup> Lu Yuhua<sup>2</sup> Liu Jianxuan<sup>2</sup> Li Hongsheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

<sup>2</sup> The First Research Institute of the Ministry of Public Security of P. R. China, Beijing 100048, China

**Abstract** Active near-infrared imaging system used for traffic monitoring and regional security monitoring is an important application of night vision system. The function range of night vision system is an important performance indicator and the main basis for system design. A method for evaluating the function range of system is proposed according to the needs of the design and analysis of active near-infrared imaging system. The method can determine the detection capability of system on the target at a given distance. Based on the calculation of the distribution of irradiance on the target at a given distance according to the atmospheric transmission theory, the irradiance is simulated utilizing the principle of equivalent lighting at a short distance. Then the detection capability of the system on the target at a given distance is evaluated according to Johnson criteria and imaging theory. The corresponding tests are carried out, and the tested results are compared with the actual outdoor measurement results. The method is applicable for general optical imaging systems.

**Key words** imaging systems; night vision; equivalent lighting; active near-infrared imaging system; evaluation method of the function range

**OCIS codes** 110.3080; 130.0250; 130.3060; 150.2950; 350.4600; 350.5730

## 1 引言

夜视技术是借助于光电成像器件实现夜间观察的一种光电技术。被动式的夜视系统靠景物对夜天

光的反射实现成像,其隐蔽性好,但是受自然照度和大气消光影响大,并且由于景物之间的反差小,图像平淡而且层次不够分明。特别是在浓云和地面烟雾

收稿日期: 2012-10-16; 收到修改稿日期: 2012-11-12

基金项目: 微光夜视技术国防科技重点实验室基金(J20110503)资助课题。

作者简介: 宋俊儒(1987—),男,硕士研究生,主要从事红外、激光和偏振成像等方面的研究。

E-mail: sjr1987bit@163.com

导师简介: 王 霞(1972—),女,博士,副教授,博士生导师,主要从事光电检测及光谱分析、微光及红外成像等方面的研究。

E-mail: angelniuniu@bit.edu.cn

情况下,景物的照度和对比度下降从而会影响观察效果。为了增强夜视系统对恶劣条件的适应能力,采用助视技术的主动夜视系统受到了特别的青睐。特别是近年来,随着 CCD/CMOS 成像技术的发展,采用助视技术辅助照明的 CCD/CMOS 成像技术由于能够实现全天候监控,被广泛应用于交通监控、区域安防监控等多个领域。随着这种主动近红外(NIR)成像系统在国内市场上的迅速推广,各方面的应用对其作用距离的检测方法提出了迫切需求。特别是针对其作用距离比较远(通常可以达到 100 m,有的甚至可以达到 200 m)的情况,如何利用等效的方法在室内有效地检测该类系统的作用距离,就成为亟待解决的问题。

本文针对厂家给出的标称距离(即观测距离),提出了一种采用等效照明原理模拟目标上辐照度分布情况,再结合光电成像理论和约翰逊准则在室内测试主动近红外成像系统在标称距离远处探测能力的方法。

## 2 主动近红外成像系统检测方法

主动近红外成像系统在交通、安防监控等许多领域具有广泛应用,其主要部件包括近红外照明光源、物镜、近红外成像器件及目镜等。典型的主动照明成像系统如图 1 所示。照明光源主要采用近红外激光器或大功率 LED。目前在近红外波段的成像系统通常选用 Si-CCD/CMOS 的成像器件或微光像增强器件[微光像增强器和增强型 CCD(ICCD)器件],工作波段在 0.76~1.1 μm 的近红外光谱区。

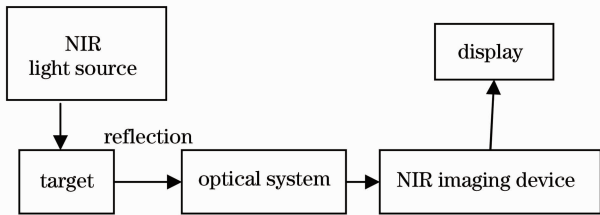


图 1 主动近红外摄像系统原理框图

Fig. 1 Schematic of active NIR camera system

本文研究的主动近红外成像系统为自带近红外 LED 光源的一体摄像机,将对系统的观测距离这个指标进行检测,判断摄像机在标定的观测距离上是否具有确切的探测能力。

本文提出的测试方法分为三部分:1)在室内搭建照度可调的光源,利用等效照明原理在有限距离内模拟主动光源的光经标称距离远处的目标反射和大气传输后进入待测摄像机的光照度分布;2)测试在 1)所得光照度分布和给定大气条件、目标对比度

下,摄像机的极限分辨率;3)结合约翰逊准则判定待测摄像机在标称距离处的探测能力。

### 2.1 等效照度模拟

采用焦斑法测得待测摄像机自带近红外 LED 光源的发散角<sup>[1]</sup>,测试原理如图 2 所示,LED 光源的发散角满足  $\tan \alpha = R/L$ ,其中  $R$  为光斑的半径, $L$  为照射距离。

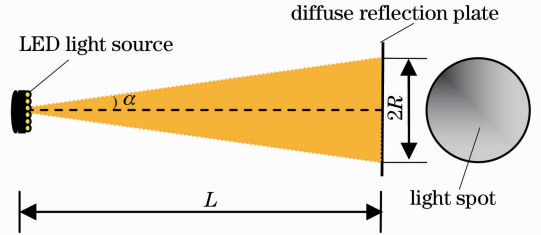


图 2 焦斑法测发散角原理图

Fig. 2 Schematic of using focal spot method to measure the divergence angle

光在大气中传输的过程中,受到大气的吸收和散射作用,会发生衰减。一般情况下,大气衰减系数  $\tau_a$  可以通过以下经验公式进行计算<sup>[2]</sup>:

$$\tau_a(\lambda, L) = \exp\left[-\frac{3.912}{R_v} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q L\right],$$

$$q = \begin{cases} 0.585R_v^{1/3}, & R_v < 6 \text{ km} \\ 1.3, & R_v \approx 10 \text{ km} \\ 1.6, & R_v > 50 \text{ km} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $R_v$  为大气能见距离, $\lambda$  为波长, $L$  为传输距离,通常取  $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$  或  $\lambda_0 = 0.61 \mu\text{m}$ 。但在某些波段,经验公式与实际情况存在较大的偏差,如图 3 所示。此时,大气衰减需要采用软件包 Lowtran 或 Modtran 计算。

经过大气的传输,进入成像系统的景物的表现对比度也会发生变化<sup>[2]</sup>:

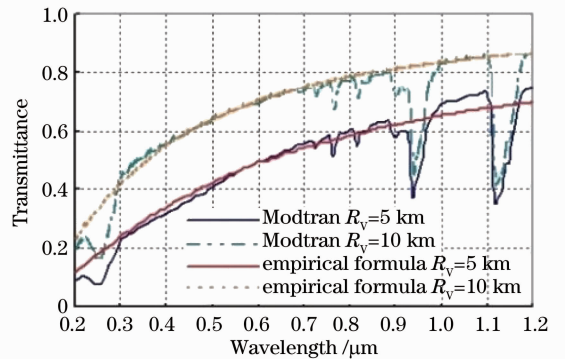


图 3 经验公式和 Modtran 计算大气衰减

Fig. 3 Results of atmosphere attenuation calculated with empirical formula and Modtran

$$C = C_0 \frac{1}{1 + K(1 - \tau_a)/\tau_a}, \quad (2)$$

式中  $C_0$  为景物固有对比度,  $K$  为地平线天空亮度与背景亮度之比。考虑上述大气衰减的影响, 待测光源的出射光经标称距离远处目标反射后进入 CCD 的照度为<sup>[3]</sup>

$$E_e = \frac{\Phi}{S} \tau_a \rho C^2 + E_{ns} = \frac{\Phi_0 \cdot \tau_a(\lambda, L)}{\pi(L \tan \alpha)^2} \tau_a(\lambda, L) \rho C^2 + E_{ns}, \quad (3)$$

式中  $\Phi_0$  为近红外光源的总功率, 单位为微瓦;  $\lambda$  为近红外光源的波长,  $\rho$  为目标的反射比,  $E_{ns}$  为环境照度。

综上所述, 假设利用主动照明摄像机观测距离为  $L_b$  处的目标, 由(3)式可求得此时进入摄像机的照度  $E_b$ 。如果利用辐照度可调的光源(光谱分布、色温与主动照明光源一致), 即可使得在室内 3~5 m 处的目标上的辐照度分布为  $E_b$ , 从而实现对远距离目标上的照度的等效模拟。

### 2.2 待测摄像机极限分辨角测试

考虑到待测摄像机观测距离较远, 目标近似为无穷远, 采用平行光管作为无限远目标发生器。在保证进入摄像机成像系统的照度为  $E_b$  的情况下, 可测得采用主动照明、观测距离为标称距离  $L_b$  时待测系统的极限分辨角<sup>[4]</sup>:

$$\tan \sigma = a/f_0, \quad (4)$$

式中  $a$  为可分辨的最小条纹的间距,  $f_0$  为平行光管的焦距。

### 2.3 待测摄像机作用距离评价

根据约翰逊准则及微光电视系统视距估算理论, 在标称距离  $L_b$  确定时, 目标高度  $H$  在指定探测等级下应满足以下关系式<sup>[2]</sup>:

$$L = f' \frac{HN}{nh}, \quad (5)$$

式中  $f'$  为光学系统焦距,  $h$  为电视幅面高度,  $N$  为  $h$  范围内的总电视线数,  $n$  为目标所占的电视线数。

根据光电成像系统探测方程, 结合(4)、(5)式, 摄像机的极限分辨角  $\sigma$  和标称距离  $L_b$  满足

$$\frac{H}{nL_b} \geq \frac{h}{Nf'} = \tan \sigma. \quad (6)$$

## 3 主动近红外摄像系统检测系统及其标定

### 3.1 主动近红外摄像系统检测系统

第2节所述的检测原理的测试系统框图如图4、5所示。图4所示为光源发散角测试系统原理

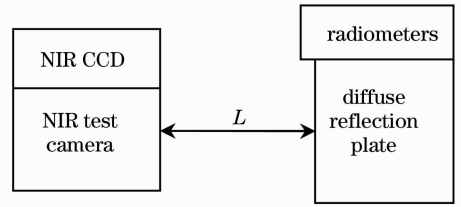


图4 光源发散角测试系统原理图

Fig. 4 Schematic of light divergence angle test system

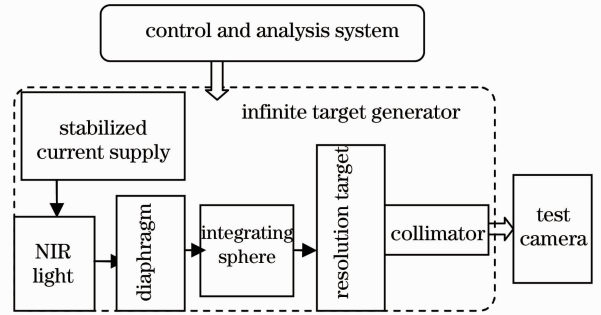


图5 摄像机极限分辨角测试系统原理图

Fig. 5 Schematic of the limited resolution angle test system of camera

图, 图5为摄像机极限分辨角测试系统原理图。

当图4所示的光源发散角测试系统工作时, 整套系统处在暗室中。将待测光源接通, 光源发出的光打在正前方的漫反射板上, 通过图4中所示的近红外 CCD 观测漫反射板上的光斑, 并当光斑处在视场正中央、大小约占总视场 1/4~1/3 时采集图像。当图5所示的摄像机极限分辨角测试系统工作时, 整套系统同样处在暗室中。将图5中所示的由稳流源、近红外光源、光阑和积分球组成的等效光源打开, 平行光管卸掉自带光源后与积分球出光口相接, 待测摄像机放置在平行光管物镜出口处, 且自带光源关闭, 显示器与待测摄像机相连。正常测试时, 通过调节等效光源的光阑控制平行光管条带靶上的辐照度, 进而通过与待测摄像机相连的显示器观测条带靶目标并采集图像。

### 3.2 等效照明系统的标定与检测

#### 3.2.1 等效光源的标定

考虑到光谱匹配的问题, 采用功率 50 W、色温 3000 K 的溴钨灯和中心波长 850 nm、带宽 40 nm 的滤光片组成等效光源。使用 USB4000 光纤光谱仪测得等效光源的光谱和待测摄像机的光谱如图6所示。光谱中心波长和带宽都符合良好, 满足设计与测试需要。

#### 3.2.2 近红外光源功率标定

由(3)式, 需要明确主动照明光源的功率  $\Phi_0$ , 但

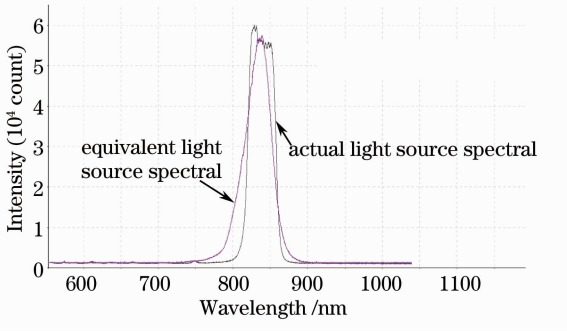


图 6 等效光源与实际光源光谱

Fig. 6 Spectra of equivalent light source and actual light source

该类摄像机往往没有明确的功率指标,需要检测时自行标定。本研究先行标定 CCD 灰度值和等效光源照度值之间的关系,然后将近距离采集到的光斑图片的灰度值替换为辐照度值,求得整幅图片辐照度的平均值,乘以光斑图片的实际面积,由此得到光源的总功率。

根据上述原理标定的 CCD 灰度值与等效光源出射的辐照度之间的关系曲线如图 7 所示。对图 7 中的数据采用  $x, x^2, \ln(x+1), x \ln(x+1)$  四个函数进行逼近拟合,得到数据所满足的数学关系式

$$f(x) = 84.47649 + 39.94045x + 0.13129x^2 - 21.29517\ln(x+1) - 10.77223x \cdot \ln(x+1), (7)$$

式中  $x$  为辐照度值,单位为微瓦每平方厘米,  $f(x)$  为图片灰度值。

表 1 目标上的等效照度与实测照度对比

Table 1 Theoretical and measured values of irradiance on the target

Serial No.	Measured source power /W	Nominal distance /m	Environmental irradiance $E_0$ /lx	Theoretical irradiance $E_t/(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$	Measured irradiance $E_m/(\mu\text{W}/\text{cm}^2)$
1	17.2	50	0.42	19.46	20.31
2	17.5	50	0.41	18.03	20.28
3	17.0	50	0.48	18.52	20.26
4	16.8	50	0.51	20.97	20.36
5	17.4	50	0.46	19.69	20.23
6	17.1	50	0.44	17.92	20.15

## 4 检测结果

检测所用的待测摄像机(康威 KWL-D501CH)的助视 LED 光源波长为 850 nm, CCD 尺寸为 1/3 inch (1 inch=25.4 mm),有效像素 976 pixel×582 pixel,红外探测距离 50 m,镜头焦距 6 mm。以同一型号的 6 具产品作为测试组。

设定实验测试条件如下:大气能见距离  $R_v =$

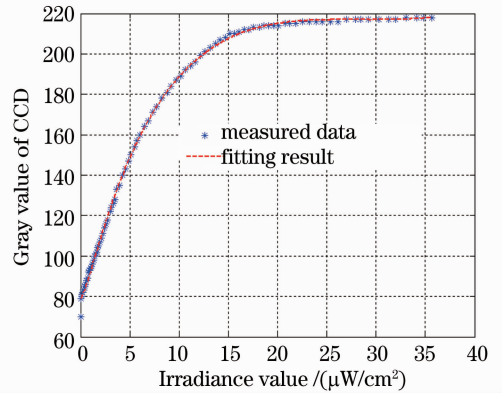


图 7 CCD 灰度值-辐照度值关系曲线

Fig. 7 Relationship between CCD gray value and irradiance value

### 3.2.3 等效照明光源的检测结果

选定一组摄像机自带的近红外光源作为测试目标,利用 3.1 和 3.2.2 中的发散角测试系统和光源功率标定方法测得该组光源在标称距离处目标上的辐照度,并与其在标称距离处实测的照度进行了对比,结果如表 1 所示。实测得到的照度与理论计算相比,最大误差为  $|20.28 - 18.03 - 0.41| / 20.28 = 9.1\%$ 。由于计算光源发散角时采用 90% 的有效光斑为准,一定程度上缩小了发散角,但是功率标定存在一定的误差,大气参数和环境照度也无法准确测量,因此存在一定的误差,理论值比实测值要小一点,我们认为若误差不超过 15% 即在允许范围内。数据表 1 证明了等效照度计算方法的合理性和等效光源的有效性。

15 km,目标固有对比度  $C_0 = 0.8$ ,目标反射比  $\rho = 0.5$ ,地天空系数  $K=2$ ,观测目标的高度  $H'$  取人的身高 1.65 m,环境照度采用晴朗夜晚的照度  $E_0 = 10^{-3}$  lx。根据焦斑法可测得该组摄像机光源发散角,再根据 3.2.2 所述的光源功率标定原理标定出的光源总功率,利用(1)~(4)式得到  $\tau_a = 0.987, C = 0.78$ ,从而计算出目标上的辐照度  $E_e$ 。整个测试结果如表 2 所示。

表 2 摄像机测试结果  
Table 2 Test results of cameras

Serial No.	Divergence angle /rad	Source power /W	Irradiance entering the CCD /( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )	Ultimate resolution angle	Test results (detect/identify/distinguish)
1	0.105	17.2	5.85	6'53"	Qualified/qualified/unqualified
2	0.110	17.5	5.42	7'17"	Qualified/unqualified/unqualified
3	0.107	17.0	5.56	7'17"	Qualified/unqualified/unqualified
4	0.100	16.8	6.30	6'29"	Qualified/qualified/unqualified
5	0.105	17.4	5.91	6'53"	Qualified/qualified/unqualified
6	0.112	17.1	5.10	7'43"	Qualified/unqualified/unqualified

调节等效光源使得进入图 5 中所示的待测摄像机的照度为  $E_c$ 。在该照度下,通过显示器中无穷远目标发生器中的分辨率靶,测得待测摄像机能够分辨的最小条纹间距,进而由(4)式计算得到极限分辨率。以序号 1 的测试为例,最小可分辨条纹间距  $a=160\ \mu\text{m}$ (见图 8),极限分辨角为  $\sigma=6'53''$ (第 13 组

条纹)。将  $\sigma$  代入(6)式中,  $\tan \sigma=0.002$ ,得到测试结果:探测等级(detect)下取  $n=6$ , (6)式成立,待测摄像机标称距离合格;识别等级(identify)下取  $n=16$ , (6)式不成立,待测摄像机标称距离合格;认清等级(distinguish)下取  $n=21$ , (6)式不成立,待测摄像机标称距离不合格。

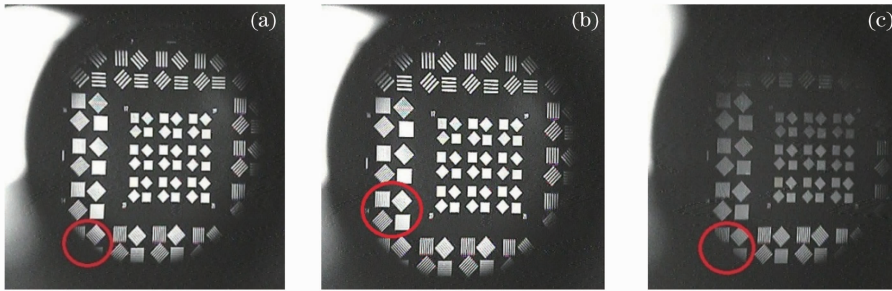


图 8 部分极限分辨率测试结果图

Fig. 8 Some tested results of the limited resolution angle

在夜间完全关灯的走廊里进行的室外直接测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,在距离为 15 m 时可以清晰分辨出人的面目,在距离为 25 m 时熟悉的人依稀可以分辨出人的面目,将  $L=15, 25, n=20$  代入(6)式中,得到认清等级下成立;距离为 40~50 m 时可以识别出人影,有时依稀可以分辨出人种,但分辨不出人的面目,将  $L=40, 50, n=20$  代入(6)式中,

认清等级下不成立,但识别等级下有时成立;对比表 1 的测试结果,探测等级下误差为零,识别等级下,实测结果有一具摄像机少有争议,误差为 8.3% (0.5除以 6),可以认为在误差允许范围内(10%)。室外实测结果与实验室内等效测试结果相符合,证明了本文提出的等效测试方法合理有效。



图 9 不同距离实测结果。(a) 15 m 测试结果; (b) 25 m 测试结果; (c) 40 m 测试结果; (d) 50 m 测试结果

Fig. 9 Actual tested results under different distances. (a) Tested result at 15 m; (b) tested result at 25 m; (c) tested result at 40 m; (d) tested result at 50 m

## 5 结 论

利用本文提出的方法及其测试系统对市场上主流的主动近红外摄像机的测试结果表明,提出的采用等效照明原理结合约翰逊准则在室内测试主动近红外成像系统的方法和配套检测系统在误差许可的范围内很有效。解决了主动近红外成像系统及其类似成像系统作用距离较远时室外测试不方便,且测试结果受环境影响较大的问题。具有较高的检测精度和可靠性,而且操作简单方便,通用性较强,对原理相近的主动成像系统都行之有效。

### 参 考 文 献

1 Xu Hui, Li Gang, Xu Rong *et al.*. Study on digital method of measuring laser diverging angle from irradiator[J]. *J. Ordnance*

*Engineering College*, 2004, **16**(2): 46~48

许 辉, 李 刚, 徐 榕 等. 激光照射指示器束散角数字化检测方法研究[J]. *军械工程学院学报*, 2004, **16**(2): 46~48

2 Bai Tingzhu, Jin Weiqi. The Photoelectric Imaging Principle and Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 102~104, 391

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. 102~104, 391

3 Jin Weiqi, Hu Weijie. Radiometry, Photometry and Colorimetry and Measurements[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 110~111

金伟其, 胡威捷. 辐射度、光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 110~111

4 Hu Wen'gang, Li Feiru, Sun Yujie *et al.*. A new method for camera resolution measurement of TV tracking system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(2): 27~28

胡文刚, 李斐如, 孙玉杰 等. 一种测量电视跟踪系统摄像头分辨率的新方法[J]. *光学与光电技术*, 2004, **2**(2): 27~28

栏目编辑: 李文喆