

文章编号:1004-4213(2010)s1-0096-5

# 像增强型 CCD 成像系统的分辨力分析

阴浩,刘广荣,金伟其,米凤文

(北京理工大学 光电学院;光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

**摘 要:**分辨力和信噪比是像增强型 CCD 成像系统的两个最主要的参量.为了分析 CCD 相机分辨力对像增强型 CCD 成像系统分辨力的影响,本文分别用一个高分辨力像增强型 CCD 相机和一个普通分辨力 CCD 相机分别与相同的中继透镜、像增强器和前置镜头耦合,得到一套高分辨力像增强型 CCD 实验样机和一套对比像增强型 CCD 实验样机;在不同照度下测量了两套实验样机的分辨力和信噪比,实验结果分析表明:当照度高于  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 时,像增强型 CCD 成像系统分辨力受器件分辨力和信噪比共同影响,高分辨力像增强型 CCD 实验样机分辨力要高于对比像增强型 CCD 实验样机分辨力.当照度低于  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 时,像增强型 CCD 成像系统分辨力主要受器件信噪比的影响,高分辨力像增强型 CCD 实验样机与对比像增强型 CCD 实验样机分辨力相当.

**关键词:**像增强型 CCD;像增强器;分辨力;信噪比

中图分类号:TN223

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0096

## 0 引言

微光夜视技术是当今主要的夜视技术手段之一.像增强型 CCD (Intensified CCD, ICCD) 成像技术是微光视频摄像的一种重要途径,可实现远距离多点观察,通过图像处理可提高图像对比度,根据不同的观察条件改变积累时间,可提高系统的增益.这些优点使其在军事科学、天文学和航空航天科学等方面获得广泛而重要的应用<sup>[1-2]</sup>.近年来,随着像增强器以及 CCD 图像传感器的发展,高分辨力的像增强器和 CCD 相机的出现使得我们可以得到更高质量的数字化图像,从而使 ICCD 的整体性能得到进一步的提升.分辨力是 ICCD 成像系统的重要参量之一,表征了 ICCD 成像系统分辨图像细节的能力.本文将计算并测量 ICCD 成像系统的分辨力,并分析 ICCD 成像系统分辨力的影响因素.

## 1 ICCD 系统

### 1.1 ICCD 成像系统的原理和组成器件

ICCD 成像系统即用像增强器与 CCD 相机耦合而成的系统<sup>[3]</sup>.如图 1,ICCD 成像系统工作时,物镜采集的目标图像经过像增强器增强后,显示在像增强器的荧光屏上,并由中继透镜成像或光锥传至 CCD 传感器,使得到达 CCD 光敏面的光照度大大增强,从而大大提高了系统对微弱光信号的探测能力.

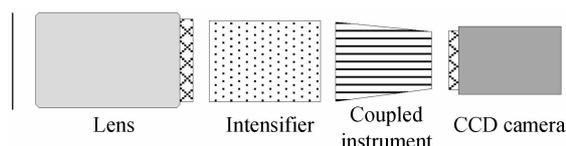


图 1 ICCD 成像系统原理图

Fig. 1 The principle of ICCD imaging system

像增强器是 ICCD 成像系统的核心器件,它由入射窗光阴极、微通道板 (Micro Channel Plate, MCP) 以及出射荧光屏组成.入射光照射光阴极后产生的电子到达 MCP, MCP 上的电子经倍增后打到出射荧光屏上产生图像信号,即形成了增强的图像.像增强器的主要参量有分辨力、信噪比、光阴极灵敏度、增益和等效背景照度等<sup>[4]</sup>.

CCD 是一种金属-氧化物-半导体结构、像元周期性排列组成的器件,能够存储由入射光在 CCD 光敏像元激发出的光信息电荷,并能在适当时序的脉冲驱动下,把存储的电荷以电荷包的形式定向传输转移,实现自扫描,完成从光信号到电信号的转换.

ICCD 的耦合方式可分为光学耦合方式和光纤耦合方式<sup>[5-6]</sup>.光学耦合方式利用中继透镜将像增强器荧光屏上的像成像在 CCD 靶面上,其优点是使用灵活,分辨力较高,但缺点是耦合效率低,系统的体积也较大;光纤耦合方式用光学纤维面板 (光纤光锥) 将像增强器和 CCD 直接耦合起来,其优点是体积小、重量轻、耦合效率高,但耦合时易造成耦合

第一作者:阴浩(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为弱光条件下的夜视技术.

导师(通讯作者):刘广荣(1956—),男,教授,主要研究方向为弱光成像技术. Email:g.liu@bit.edu.cn

收稿日期:2010-08-10;修回日期:2010-10-18

失败,成品率较低。

## 1.2 实验样机制作

实验目的是要用高分辨力 CCD 相机耦合出一套高分辨力 ICCD 实验样机,并用普通分辨力 CCD 相机耦合一套对比 ICCD 实验样机,对比两套样机的分辨力,研究 CCD 相机分辨力对 ICCD 系统分辨力的影响。据此,选用了两套 ICCD 成像系统的组成器件,并设计了 ICCD 成像系统机械结构,组装出两套实验样机。

选用 Computar V7514 作为两套 ICCD 成像系统物镜(如图 2),其焦距 75 mm,  $F$  数 1.4~22,分辨力 90 lp/mm, C 接口。



图 2 Computar V7514 镜头  
Fig. 2 Computar V7514 lens

选用荷兰 DEP 公司的 XR5 型超二代像增强器(如图 3)作为两套 ICCD 成像系统的像增强器,其分辨力 72 lp/mm,灵敏度 800  $\mu\text{A}/\text{lm}$ ,信噪比 28 dB,荧光屏  $\Phi 18$  mm。



图 3 XR5 像增强器  
Fig. 3 XR5 image intensifier

考虑到光学耦合的灵活性和光纤耦合的耦合效率,设计并研制了 1/2 inch 中继透镜(如图 4)作为



图 4 中继透镜  
Fig. 4 Coupled lens

两套 ICCD 成像系统的耦合装置,其分辨力 100 lp/mm,物像尺寸分别为 18 mm 和 8 mm。

选用 AVT 公司 1/2 inch 摄像机 F-146B 作为高分辨力 ICCD 成像系统的摄像机(如图 5),探测器规模为 1 388  $\times$  1 038,像元大小为 4.65  $\mu\text{m} \times$  4.65  $\mu\text{m}$ ,填充率为 1, C 接口。选用 AVT 公司的 1/2 inch 摄像机 F-033B 作为对比 ICCD 成像系统的摄像机(如图 6),探测器规模为 656  $\times$  492,像元大小为 9.9  $\mu\text{m} \times$  9.9  $\mu\text{m}$ ,填充率为 1, C 接口。两台摄像机的外观是相同的。



图 5 F-146B 相机  
Fig. 5 F-146B camera



图 6 F-033B 相机  
Fig. 6 F-033B camera

根据器件结构特征,设计加工了 ICCD 成像系统的机械结构,研制的 ICCD 实验样机如图 7。

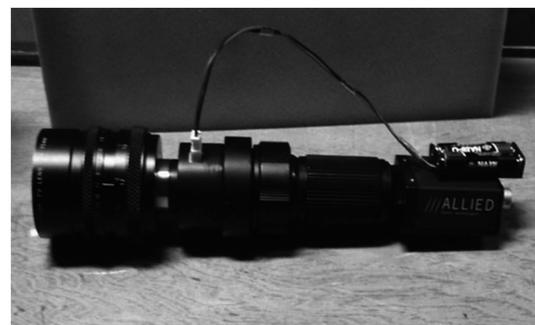


图 7 ICCD 实验样机  
Fig. 7 ICCD sample machine

## 2 ICCD 成像系统分辨力分析

物镜、像增强器和中继透镜的分辨力都可通过查各自的说明得到。其中,物镜分辨力为 90 lp/mm,

像增强器分辨力为 72 lp/mm, 中继透镜分辨力为 100 lp/mm.

CCD 相机的极限分辨力由其像元尺寸所决定. 在理想情况下, 纯黑和纯白的条纹恰好各占一个像元宽度时可分辨条纹. 此时一个线对宽度为两个像元, CCD 相机的分辨力  $R$  为<sup>[7]</sup>

$$R=1/2d \quad (1)$$

式中,  $d$  为 CCD 像元间隔.

F-146B 相机的像元尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ , 填充率为 1, 因此水平和垂直方向像元间隔  $d = 4.65 \mu\text{m}$ , 由式(1)计算出其分辨力为 107.53 lp/mm. F-033B 相机的像元尺寸为  $9.9 \mu\text{m} \times 9.9 \mu\text{m}$ , 填充率为 1, 同样可算出其分辨力为 50.51 lp/mm.

计算 ICCD 系统分辨力时应将各个器件换算到同一基准面, 此处选择像增强器光阴极面作为分辨力基准面. 中继透镜分辨力除以中继透镜的放大率便可得到它在像增强器光阴极面的分辨力 44.44 lp/mm. 同理, CCD 分辨力除以中继透镜的放大率便可以得到它在像增强器光阴极面的分辨力.

F-146B 相机在像增强器光阴极面分辨力为 47.79 lp/mm, F-033B 相机在像增强器光阴极面分辨力为 22.45 lp/mm. 物镜和像增强器的分辨力即它们在光阴极面的分辨力.

ICCD 系统的分辨力可由各器件分辨力计算<sup>[8]</sup>

$$R_{\text{ICCD}} = \left( \frac{1}{R_{\text{fl}}^2} + \frac{1}{R_{\text{i}}^2} + \frac{1}{R_{\text{cl}}^2} + \frac{1}{R_{\text{CCD}}^2} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

式中,  $R_{\text{ICCD}}$  是 ICCD 系统分辨力,  $R_{\text{fl}}$  是物镜分辨力,  $R_{\text{i}}$  是像增强器分辨力,  $R_{\text{cl}}$  是中继透镜分辨力,  $R_{\text{CCD}}$  是 CCD 相机分辨力. 计算两套 ICCD 成像系统在像增强器光阴极面的分辨力, 并与器件分辨力计算结果整理得到表 1.

表 1 两套 ICCD 系统在光阴极面分辨力  
Table 1 Two ICCD systems' resolving power

	High resolving power	Comparing ICCD
$R_{\text{fl}}$ (lp/mm)	90	90
$R_{\text{i}}$ (lp/mm)	72	72
$R_{\text{cl}}$ (lp/mm)	44.44	44.44
$R_{\text{CCD}}$ (lp/mm)	47.79	22.45
$R_{\text{ICCD}}$ (lp/mm)	28.17	18.88

由表 1 可以看出:

1) 对于对比 ICCD 系统, 在像增强器光阴极面上, CCD 相机分辨力远远小于物镜和像增强器分辨力, 离中继透镜分辨力也有一定差距, CCD 相机分辨力是系统分辨力的瓶颈, 想要获得更高分辨力的系统就要提高 CCD 相机的分辨力, 即选用更小像元尺寸的 CCD 相机.

2) 高分辨力 ICCD 系统是在对比 ICCD 系统基础上, 更换了更小像元的 CCD 相机, 从而提升了系统分辨力. 对于高分辨力 ICCD 系统, 物镜和像增强器的分辨力要高于中继透镜和 CCD 相机的分辨力, 中继透镜和 CCD 相机分辨力都是 ICCD 系统分辨力的瓶颈, 要想进一步提升 ICCD 系统的分辨力, 需要提高中继透镜和 CCD 相机的分辨力和减小中继透镜的放大率.

### 3 ICCD 成像系统的信噪比

ICCD 成像系统噪音主要来源于 CCD 相机和像增强器. 在 CCD 相机中存在光子噪音、散粒噪音、转移噪音、暗电流噪音等. 像增强器的噪音主要有光电阴极噪音、微通道板噪音、荧光屏颗粒噪音等.

ICCD 成像系统的信噪比测量方法为: 在均匀照明下, 用 ICCD 系统对均匀目标采集  $n$  帧图像, 计算每个像元灰度的平均值  $\bar{s}$ , 和每个像元灰度与平均灰度的均方差  $\sigma^2$ . 然后根据式(3)计算得到系统信噪比<sup>[9]</sup>

$$\text{SNR} = 20 \lg \left( \frac{\bar{s}}{\sqrt{\sigma^2}} \right) \quad (3)$$

本文所用两套 ICCD 实验样机中, 像增强器的信噪比为 28 dB ( $10^{-2}$  lx), 而两台 CCD 相机的实测信噪比为 39 dB, 因此两套 ICCD 实验样机信噪比主要受像增强器信噪比影响.

### 4 实验与分析

为了测量不同照度下两套实验样机的分辨力, 在暗室搭建好实验系统, 系统框图如图 8.

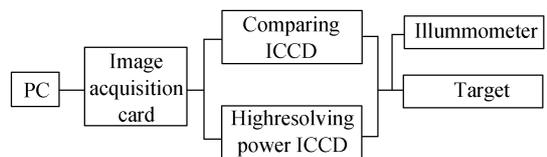


图 8 实验系统框图

Fig. 8 The block diagram of experimental system

对比 ICCD 成像系统和高分辨力 ICCD 成像系统对同一分辨力靶标成像, 通过 1394 图像采集卡把数据传入主机, 将双路图像显示到显示器. 照度计放到分辨力靶标前, 测得不同条件下的照度.

在不同照度下, 利用图像采集软件来采集两套 ICCD 实验样机的分辨力靶标图像. 图 9 和图 10 是照度为  $4.22 \times 10^{-1}$  lx 条件下高分辨力 ICCD 系统和对比 ICCD 系统采集的分辨力靶标图细节. 然后采集标准白板图像, 根据图像灰度计算 ICCD 系统的信噪比.

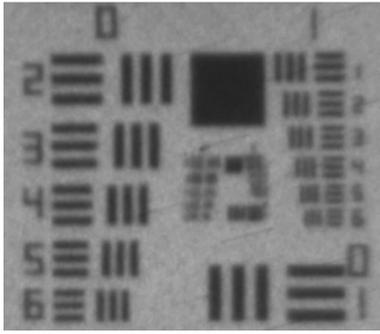


图9 高分辨力 ICCD 样机采集图像细节  
Fig.9 The image of high resolving power ICCD

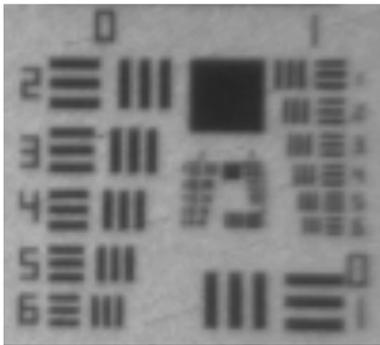


图10 对比 ICCD 样机采集图像细节  
Fig.10 The image of comparing ICCD

通过能够分辨清楚的靶标尺寸可以计算出两套 ICCD 样机的分辨力,与计算的信噪比一并整理得到表 2.

表 2 两套 ICCD 样机实测分辨力和信噪比

Table 2 Two ICCD systems' resolving power and SNR

Target illumination/lx	High resolving power ICCD		Comparing ICCD	
	R/(lp/mm)	SNR/dB	R/(lp/mm)	SNR/dB
$4.22 \times 10^{-1}$	23.37	31.04	16.54	29.71
$1.41 \times 10^{-2}$	16.54	26.15	13.13	24.60
$6.27 \times 10^{-3}$	13.13	25.17	11.71	24.97
$1.84 \times 10^{-3}$	8.27	23.22	8.27	23.18
$6.54 \times 10^{-4}$	5.85	24.51	5.85	22.75
$9.13 \times 10^{-5}$	3.68	16.06	3.68	14.62
$3.80 \times 10^{-5}$	—	13.54	1.84	11.69

分析实验数据可知:

1) 在靶标照度为  $4.22 \times 10^{-1}$  lx 时,高分辨力 ICCD 样机分辨力为 23.37 lp/mm,接近于其理论分辨力 28.17 lp/mm;对比 ICCD 样机分辨力为 16.54 lp/mm,接近于其理论分辨力 18.88 lp/mm.此时,高分辨力 ICCD 样机的分辨力远远高于对比 ICCD 样机.

2) 当靶标照度由  $4.22 \times 10^{-1}$  lx 到  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 逐渐减小时,两套样机信噪比减小,分辨力减小,且高分辨力 ICCD 样机分辨力的优势也在逐渐变小.

3) 当靶标照度在  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 到  $9.13 \times 10^{-5}$  lx 范围时,两套样机分辨力相同.

4) 当靶标照度为  $3.80 \times 10^{-5}$  lx 时,高分辨力 ICCD 样机虽能够探测到目标,但由于图像对比度较差,已很难分辨靶标线对;而对比 ICCD 样机能够分辨到-2 组 2 对线对仍可计算它的分辨力.

综上所述,可得到以下结论:

1) 当照度在  $4.22 \times 10^{-1}$  lx 以上时,ICCD 系统的分辨力由各器件的分辨力决定,高分辨力 ICCD 样机的分辨力要远远高于对比 ICCD 样机.

2) 当照度在  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 到  $1.41 \times 10^{-2}$  lx 范围时,ICCD 系统的分辨力由各器件的分辨力以及信噪比共同影响,信噪比方面主要受像增强器信噪比的制约,高分辨力 ICCD 系统分辨力的优势变得不明显.

3) 当照度在  $9.13 \times 10^{-5}$  lx 到  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 范围时,ICCD 系统的分辨力由各器件的信噪比决定,高分辨力 ICCD 样机分辨力与对比 ICCD 样机分辨力相同.

4) 当照度小于  $9.13 \times 10^{-5}$  lx 时,ICCD 系统分辨力受到 CCD 相机灵敏度和器件信噪比的影响,由于对比 ICCD 系统的像元更大,对比 ICCD 系统更占优势.通过对比度拉伸、binning 等方法来克服 CCD 相机灵敏度的影响(如图 11).使得高分辨力 ICCD 样机在光照不足的情况下仍然有与对比 ICCD 样机相当的分辨力.

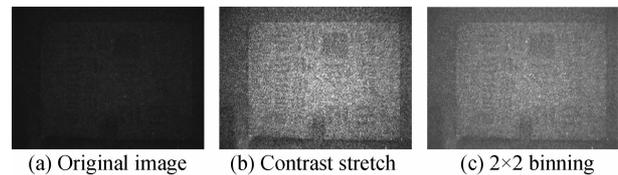


图 11 处理后图像与原图像对比( $3.80 \times 10^{-5}$  lx)

Fig.11 The contrast of processed image and original image

## 5 结论

为了分析 CCD 相机分辨力对 ICCD 成像系统分辨力的影响,本文分别用一个高分辨力 CCD 相机和一个普通分辨力 CCD 相机分别与相同的中继透镜、像增强器和前置镜头耦合,得到一套高分辨力 ICCD 实验样机和一套对比 ICCD 实验样机.计算了两套 ICCD 样机的理论分辨力,并在不同照度下测量了两套系统的实际分辨力和信噪比.结果表明:ICCD 成像系统的分辨力受各器件分辨力,中继透镜放大率,像增强器信噪比和灵敏度,等多种因素影响.并且在不同的照度下,各个因素的影响大小也不同.当照度在  $4.22 \times 10^{-1}$  lx 以上时,ICCD 成像系统分辨力受各器件分辨力和中继透镜放大率影响;当照度在  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 到  $1.41 \times 10^{-2}$  lx 时,系统分辨力主要受器件分辨力,中继透镜放大率和像增

强器信噪比影响;当照度在  $9.13 \times 10^{-5}$  lx 到  $1.84 \times 10^{-3}$  lx 时,系统分辨力主要受像增强器信噪比影响;当照度小于  $9.13 \times 10^{-5}$  lx 时,系统信噪比受像增强器信噪比和 CCD 相机灵敏度影响。

#### 参考文献

- [1] ZHOU Li-wei. On figure of merit of low light level image intensifiers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 332-337.  
周立伟. 关于微光像增强器的品质因数[J]. 红外与激光工程, 2004, **33**(4): 332-337.
- [2] CHENG Kai-fu. Development trend of low light level imaging devices[J]. *Electronic Component & Device Applications*, 2004, **6**(10): 7-9.  
程开富. 微光摄像器件的发展趋势[J]. 电子元器件应用, 2004, **6**(10): 7-9.
- [3] JIN Wei-qi, LIU Guang-rong, BAI Ting-zhu, *et al.* Some technological progresses and their analysis in night vision[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 405-409.  
金伟其, 刘广荣, 白廷柱, 等. 夜视领域几个热点技术的进展及分析[J]. 光学技术, 2005, **31**(3): 405-409.
- [4] LEON A Bosch. Image intensifiers tube performance is what matters[C]. *SPIE*, 2000, **4128**: 65-78.
- [5] CUI Zhi-gang, BAI Ting-zhu, GAO Zhi-yun, *et al.* Analysis on the non-uniformity of ICCD caused by fiber optic taper coupling[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, **27**(4): 210-213.
- [6] WANG Yao-xiang, TIAN Wei-jian, HUANG Kun, *et al.* Theoretical analysis of the coupling efficient between fiber taper and CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 318-321.  
王耀祥, 田维坚, 黄琨, 等. 光锥与 CCD 耦合效率的理论分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(3): 318-321.
- [7] WU Hao-hao. Design and analysis of high performance digital ICCD system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.  
吴昊昊. 大面阵数字式 ICCD 成像系统设计与性能评估[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
- [8] ZUO Fang, LIU Guang-rong, GAO Zhi-yun, *et al.* Performance analysis of low light level image sensors: BCCD, ICCD, EBCCD [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2002, **22**(1): 109-112.  
左昞, 刘广荣, 高稚允, 等. 用于微光成像的 BCCD、ICCD 和 EBCCD 性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2002, **22**(1): 109-112.
- [9] LI Sheng-cai, JIN Wei-qi, ZHANG Chang-quan. The 3-D noise measurement and analysis of low-light-level imaging system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, **25**(5): 439-442.  
李升才, 金伟其, 张长泉. 微光成像系统三维噪声测量及其分析[J]. 北京理工大学学报, 2005, **25**(5): 439-442.

## Analysis of the Resolving Power of ICCD System

YIN Hao, LIU Guang-rong, JIN Wei-qi, MI Feng-wen

(School of Optoelectronics; Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System (Ministry of Education),  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Resolving power and signal to noise ratio are two key indicators of ICCD system. In order to analyze the influence of resolving power of ICCD, a high resolving power ICCD sample machine and a comparing ICCD sample machine were assembled. The resolving power and signal to noise ratio of two ICCD sample machines were measured in different illumination. The experimental result shows: when the illumination is above  $1.84 \times 10^{-3}$  lx, the resolving power of the ICCD system is under the influence of resolving power and signal to noise ratio of devices. The resolving power of high resolving power ICCD sample machine is higher than the comparing ICCD sample machine's. When the illumination is below  $1.84 \times 10^{-3}$  lx, the resolving power of the ICCD system is under the influence of signal to noise ratio of devices. The resolving powers of two systems are equal.

**Key words:** ICCD; Image intensifier; Resolving power; Signal to noise ratio