

文章编号: 0258-7025(2009)06-1383-05

# 一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究

靳辰飞 赵远 张勇 何姜 孙秀冬

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 研究了一种无扫描三维成像激光雷达。采用脉冲固体激光器作为发射光源,而带有像增强器的 CCD (ICCD)作为成像探测器。激光器发射光脉冲的同时用随时间单调变化的高压调制 ICCD 中的像增强器,使其产生随时间单调变化的增益调制,这样不同距离的目标回波被放大的程度不同。通过对被放大信号能量的比较分析,就可以解算各个脉冲的飞行时间,从而得到各个脉冲对应的距离。结果验证了这种成像系统可有效地消除回波强度不均匀性的影响。通过室内成像实验验证系统成像,在 35~41 m 的距离上成功地获取了目标的距离像,测距精度可达 1 m 以下。

**关键词** 激光技术; 激光雷达; 增益调制; 距离像

中图分类号 TN958. 98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1383

## Experimental Research on a Scannerless 3D Imaging Laser Radar

Jin Chenfei Zhao Yuan Zhang Yong He Jiang Sun Xiudong

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A scannerless 3D imaging laser radar is developed. A pulsed solid state laser is used as source with image intensified CCD (ICCD) as imaging detector. When the laser source transmits light pulse to a target scene, the image intensifier of ICCD is modulated with the monotone time-variant high voltage. High voltage signal controls the image intensifier to produce the monotone time-variant gain modulation, which leads to different amplification factor on return light reflected from different range. By analyzing and comparing the energy of amplified signals, we can calculate the flight time of every return light and then get the range of the corresponding target. Results demonstrate that the system can effectively eliminate the effect of non-uniform of the return light intensity. An indoor imaging experiment is performed for demonstrating the feasibility of system, and range image of targets from 35 to 41 meters distance is successfully acquired and the range accuracy can be less than 1 meter.

**Key words** laser technique; laser radar; gain modulation; range image

## 1 引 言

以往的成像激光雷达因采用光机扫描系统,存在着帧频低、体积大、高速条件下图像畸变大等缺点。20 世纪 90 年代出现的多种无扫描成像激光雷达抛弃了机械扫描装置,具有高帧频、宽视场、体积小等特点,在武器精确制导、军事目标识别、空间交会对接、地形测绘等领域有着良好的应用前景<sup>[1~9]</sup>。无扫描成像激光雷达的研究难点在于如何用面阵探测器去获得目标的距离像。一种办法是利用调幅连续波(AM/CW)测距,即利用正弦波调制激光器的

输出幅度和接收系统的增益,通过检测回波与被调制增益的相位差来获得距离。美国 Sandia 国家实验室从 90 年代起就一直致力于研究基于 AM/CW 方案的无扫描激光成像雷达,并进行了多次试验,证明了该系统具有很高的性能<sup>[7~11]</sup>。国内也有科研机构开展这方面的研究,而且提出新的增益调制成像方式,但还仅限于成像方法的理论和单单元原理性实验研究<sup>[12,13]</sup>。本文研究了一种脉冲式的增益调制三维成像激光雷达。本系统采用脉冲激光器发射窄脉冲,采用变化高压调制接收器增强型 CCD

收稿日期: 2008-07-16; 收到修改稿日期: 2008-10-16

基金项目: 总装预研基金(9140A01040307HT0125)资助项目。

作者简介: 靳辰飞(1979—),男,工程师,博士研究生,主要从事光电探测方面的研究。E-mail:jinchfenfei@hit.edu.cn

导师简介: 孙秀冬(1963—),女,教授,主要从事光电探测及光信息存储领域的研究。E-mail:xdsun@hit.edu.cn

(ICCD)的像增强器,使其产生随时间单调变化的增益,从而使不同距离的目标回波被放大的程度不同,通过对最终接收脉冲能量的比较分析,就可以求得各个目标的距离。

## 2 增益调制距离成像原理

本系统采用的测距方法在基于 AM/CW 原理上做了很大改进,可以使激光器在脉冲工作方式下完成两帧成一幅距离像的功能。激光器发射脉冲的同时,利用电压调制使 ICCD 的增益随时间单调线性变化。所以回波脉冲到达像增强器的时刻所对应的增益,和脉冲的往返时间成线性关系,最终在 CCD 上获得像的强度值和脉冲的往返时间成线性关系。这个过程相当于系统在增益调制下对目标成了一帧强度像。这幅图像中包含了两种信息:1) 目标回波的强度分布信息;2) 由于目标各点距离不同,导致各点回波到达接收器时所对应的增益不同,最终体现在 CCD 上所成像的灰度对比有所变化。如果再在某个给定的常数增益下,对目标成一帧强度像,这帧像中就只包含目标回波的强度分布信息。对比两帧图像,将图像中的强度信息去掉,再经过数学解算,就得到了目标的距离信息。系统的工作时序如图 1 所示。

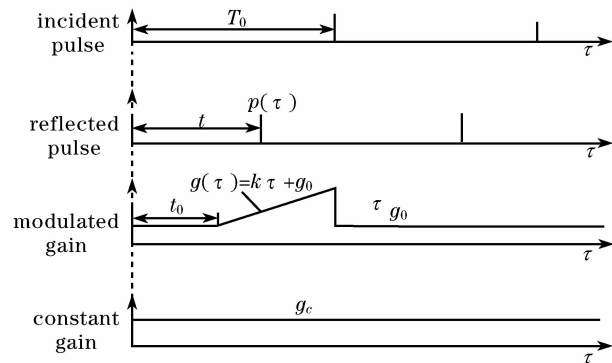


图 1 增益调制成像时序图

Fig. 1 Time sequence for gain-modulated imaging method

由于脉冲很窄,接收机的任一成像单元接收到的光脉冲近似用  $\delta$  函数来表示,接收功率为

$$p(\tau) = n\delta(\tau - t), \quad (1)$$

其中  $t$  为回波到达接收器的时间,  $n$  为回波能量的光子数。  $T_0$  为激光器的重复周期,  $g_c$  为常数增益,  $g(\tau)$  为接收机的调制增益

$$g(\tau) = k(\tau - t_0) + g_0, \quad (2)$$

其中  $t_0$  为发射脉冲与调制增益之间的延时,  $g_0$ ,  $k$  为调制增益的初始值和斜率。 CCD 上获得的值

$$A = \int p(\tau)g(\tau)d\tau = \int n\delta(\tau - t)g(\tau)d\tau = ng(t), \quad (3)$$

$$B = \int p(\tau)g_c d\tau = \int n\delta(\tau - t)g_c d\tau = ng_c. \quad (4)$$

调制过程通过增益对光强的调制,获得两个测量值,分别为  $A, B$ 。其中量  $A$  既包含了信号的强度信息,又包含信号的飞行时间信息(距离信息)。通过测量  $A, B, g_c$  以及  $g(t)$  的具体形式可将  $t$  解算出来,即

$$\frac{A}{B} = \frac{ng(t)}{ng_c} = \frac{g(t)}{g_c}, \quad (5)$$

$$t = \frac{g_c}{k} \left( \frac{A}{B} - \frac{g_0}{g_c} \right) + t_0, \quad (6)$$

最终成像单元所测的距离为

$$R = \frac{cg_c}{2k} \left( \frac{A}{B} - \frac{g_0}{g_c} \right) + \frac{ct_0}{2}, \quad (7)$$

其中  $c$  为光在真空中的传播速度。

按照以上原理,在室内搭建了原理性成像系统,结构如图 2 所示。系统采用一个脉冲固体激光器作为照明光源,可以发射脉宽为 10 ns,重复频率为 1 Hz,波长为 532 nm 的绿光。接收器采用带有二代像增强器的 ICCD,阴极量子效率约为 18% (532 nm),波长响应范围为 180~850 nm。发射光部分经分光片被反射到 PIN 上转化为电信号来触发后面的高压电源。其余大部分发射光经扩束镜整形后照射在目标上,从目标上返回的光波经接收光学系统接收且被像增强器进行光放大。像增强器的增益受高压电源的控制,高压电源输出特定的高压电信号施加在像增强器上,所产生的增益和外加电压具有单调的对应关系,通过预先设定电压的输出波形可以使像增强器产生需要的增益调制波形。经像增强器放大的信号被一分辨率为  $1024 \times 256$  的 CCD(实际与像增强器耦合的像元约为  $256 \times 256$ ) 接收并转换为电信号,像增强器和 CCD 之间通过光纤锥耦合。图 3 为系统实物图。

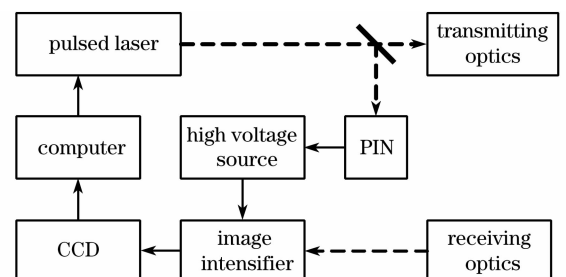


图 2 系统结构框图

Fig. 2 Schematic diagram of the system

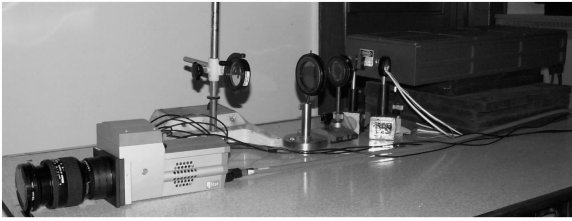


图 3 系统实物图  
Fig. 3 Photo of the system

### 3 回波强度不均匀性的影响

(7)式给出了成像单元换算距离信息的方法。如果要实现距离成像,需要多个像元同时按照上面的方法提取距离信息。但是由于照明光和目标反射率的空间不均匀性,使得各个像元接收到回波强度呈现不均匀性。从前面的公式推导来看,通过两次

成像处理可将这种不均匀性去掉。通过一个室内实验来加以验证。目标是一个标准的平面朗伯体,如图 4(a)所示,先在增益 114 下用 ICCD 成一帧像作为基准增益强度像,如 4(b)所示。然后分别在不同的恒定增益 242, 317, 408, 515 下对目标进行成像。如图 5 所示,朗伯体上的光强呈现出中间强、边上弱的高斯分布。用图 5 中的图像分别和增益为 114 的图像对比,得到了如图 6 所示的图像,朗伯体上已不再具有高斯分布的强度信息,而呈现出均匀分布的灰度值。经过计算处理,各图像灰度的均值约等于各自的增益再除以 114。从这个实验可以看出,上述的方法可以有效地将图像中的强度不均匀性去掉,而仅保留两幅图像的增益比。如果这个增益比和距离有关系,就可以将图像中目标对应距离算出来。

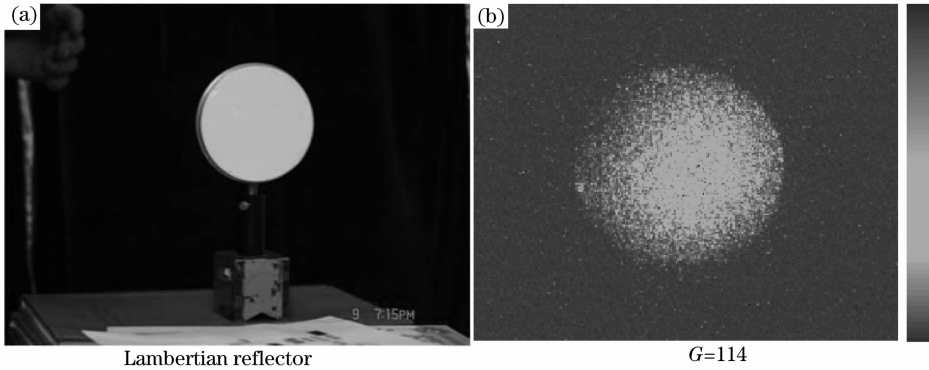


图 4 标准目标和基准增益强度像  
Fig. 4 Standard target and intensity image

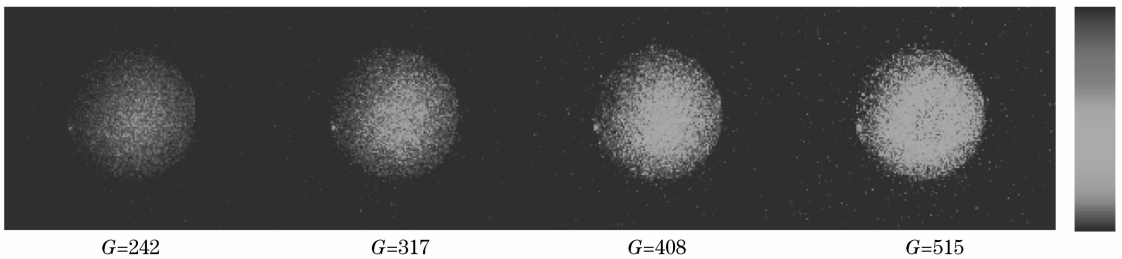


图 5 不同增益下标准朗伯体的强度像  
Fig. 5 Images of lambertian reflector with different gain

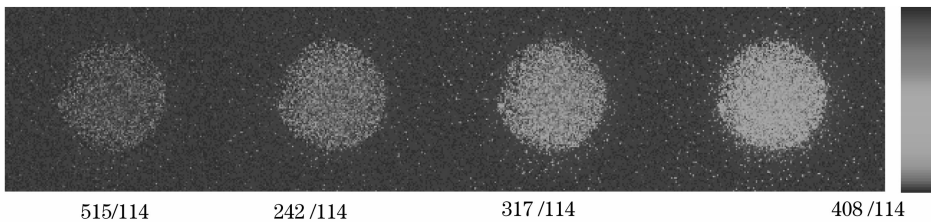


图 6 不同增益强度像和基准增益强度像做除法  
Fig. 6 Images with different gain dividing the standard image

### 4 室内实验

做了一组室内成像实验,目标是一组不同形状、不同大小的硬纸板,如图 7 所示。这组目标一共包括 4 个物体,中间 2 个是圆形的,直径分别为 40 cm 和 60 cm,两边的目标都是方形的,边长分别为 20 cm 和 90 cm。这组目标被悬挂在走廊的天花板上,彼此相隔 2 m,最近的一个距离接收器 35 m。

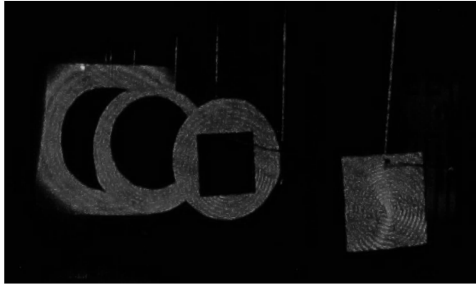


图 7 成像目标

Fig. 7 Photograph of targets

实验中采用线性增益调制,如图 8 所示。纵坐标为 ICCD 的增益。从图中可以看出,增益调制斜率约为 1/ns。图 9(a)是在线性增益调制下系统所成的目标强度像,图像的像元值依赖对应区域的目标回波强度和回波的增益,而回波的增益由此区域目标到接收器间的距离决定。图 9(b)是一帧在常数增益下所成的标准强度像,增益为 10。由于

强度上非常相近,单从图 9(b)中无法分辨出 4 个不同大小的目标,只能看出最大目标的外轮廓。

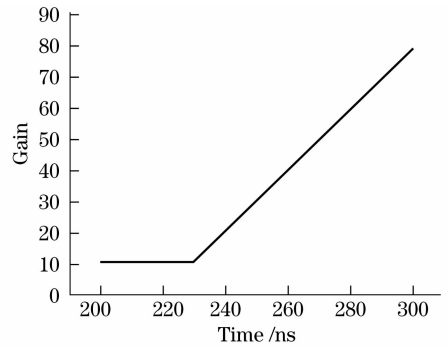


图 8 室内实验中所用的增益调制曲线

Fig. 8 Modulated gain in indoor experiments

通过对图 9(a)和(b)进行处理,就可将距离信息提取出来。图 9(c)就是最终获得的距离像,单位为 m。从图中可以清楚地分辨出 4 个目标,不同的颜色代表不同的距离,最大的目标和中间的两个圆形目标可以分辨出各自的形状。而最近的目标由于面积太小,在图像上占有的像元数比较少,因而分辨得不太清楚。从距离像上还可以看出,各个目标上的距离值并不相同,存在着一定的起伏。这主要是由信号的起伏和接收器件自身的噪声引起的,如果这种干扰很大,会严重地影响最终的测距精度。

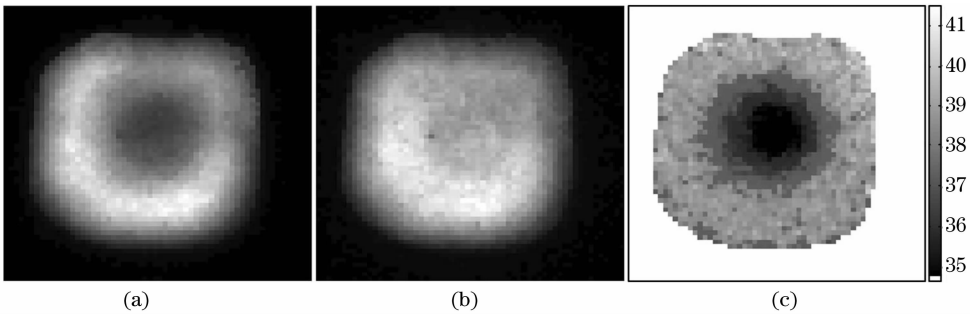


图 9 室内实验成像结果。(a) 增益调制下的强度像;(b) 常数增益下的强度像;(c) 距离像

Fig. 9 Results of indoor experiments. (a) Image with modulated gain; (b) Image with constant gain; (c) Range image

本系统的测距精度主要受两个因素影响,一是调制增益和发射信号之间延时控制的精度,目前系统的时间控制精度可达纳秒量级,这主要取决于电路设计工艺,随着电路设计和电子元件的发展,这个精度还可能进一步提高。二是对成像灰度值精确测量。根据误差传递规律可知,最终探测距离的误差决定于 ICCD 上两次成像灰度值的偏差

由式(3),(4),(7)可得

$$\Delta R = \frac{c}{2} \left( \frac{g_0}{k} + t - t_0 \right) \sqrt{\frac{\Delta A^2}{A^2} + \frac{\Delta B^2}{B^2}} \quad (9)$$

为了定量描述精度,引入参量 A, B, R 多次重复测量的均方根误差分别为  $\sigma_R, \sigma_A, \sigma_B$ 。由(9)式可知

$$\sigma_R = \frac{c}{2} \left( \frac{g_0}{k} + t - t_0 \right) \sqrt{\frac{\sigma_A^2}{A^2} + \frac{\sigma_B^2}{B^2}} \quad (10)$$

由于探测系统比较复杂,引起  $\sigma_A, \sigma_B$  的涉及到多种因素,为了讨论方便,将噪声干扰分为两个阶

$$\Delta R = \sqrt{\left( \frac{\partial R}{\partial A} \right)^2 \Delta A^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial B} \right)^2 \Delta B^2}, \quad (8)$$

段:1) 光信号经光电阴极转换为光电子但尚未进入微通道板,引入的噪声主要包括:信号本身的量子起伏噪声、大气抖动引起的信号随机变化、阴极的热噪声等。这时信号的信噪比为输入信噪比  $SNR_{in}^{[14]}$ 。2) 光电子经微通道板倍增,再经高压加速打在荧光屏上,最终落在 CCD 上显示。这个阶段引入的噪声涉及到三个器件的各类噪声,多且繁杂。一般应用上常引入噪声因子  $F_{ICCD}$  来描述噪声对信号的影响

$$F_{ICCD} = \frac{SNR_{in}^2}{SNR_{out}^2}, \quad (11)$$

$F_{ICCD}$  可利用实验的方法测得。对于 ICCD 来说,  $F_{ICCD}$  的典型值一般取  $4^{[15,16]}$ 。实验输出信噪比  $SNR_{out}$  为  $A/\sigma_A$ , 由于获得  $A, B$  两次成像实验条件大致相同,  $\sigma_A^2/A^2 \approx \sigma_B^2/B^2 = F_{ICCD}/SNR_{in}^2$

$$\sigma_R = \frac{c}{2} \left( \frac{g_0}{k} + t - t_0 \right) \sqrt{\frac{2F_{ICCD}}{SNR_{in}^2}}. \quad (12)$$

表 1 是实验中系统测得的测距精度,目标由近到远依次为 I, II, III, IV, 第二列为目标像元中最小的测距精度,第四列为目标像元中最大的测距精度,第三列为目标所有像元测距精度的平均值。

表 1 成像系统的测距精度

Table 1 Range accuracy of the imaging system

Target	Min $\sigma_R/m$	Mean $\sigma_R/m$	Max $\sigma_R/m$
I	0.21	0.39	0.63
II	0.47	0.75	1.01
III	0.81	1.04	1.37
IV	0.64	0.85	1.33

## 5 结 论

研究了一种无扫描三维成像激光雷达,仅通过成两帧灰度像就可获得目标的三维信息。通过实验验证了增益调制测距的可行性,在 35~41 m 的距离上成功地获取了间隔 2 m 的 4 个目标的距离像。探测器有效成像像元为  $256 \times 256$ , 测距精度可达 1 m 以下。精度分析表明提高信噪比、改变调制增益参数是提高测距精度的有效方法。通过改变调制增益参数和改进系统结构来单帧获得高精度距离像将是下一步的研究工作。

## 参 考 文 献

- 1 J. Christopher Dries, Brian Miles, Roger Stettner. A  $32 \times 32$  pixel FLASH laser radar system incorporating InGaAs PIN and APD Detectors[C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 250~256
- 2 Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang *et al.*. Imaging by single-slit streak tube laser lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 496~500  
魏靖松,程元丽,徐强等. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 496~500
- 3 Li Sining, Wang Qi, Liu Jinbo *et al.*. Experimental research on resolution of streak tube imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1023~1026  
李思宁,王 琪,刘金波等. 条纹管激光成像系统空间分辨力实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1023~1026
- 4 Li Sining, Guang Yuhao, Zang Junheng *et al.*. Analysis and design of data processing system based on streak tube imaging lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 943~946  
李思宁,广宇昊,臧俊恒等. 条纹管激光成像雷达数据处理系统分析与设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 943~946
- 5 William Ruff, John Bruno, Steve Kennerly. Self-mixing detector candidates for an FM/CW lidar architecture[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 152~162
- 6 Deni Bonnier, Vincent Larochelle, Active Surveillance Group. A range-gated active imaging system for search and rescue, and surveillance operations[C]. *SPIE*, 1996, **2744**: 134~145
- 7 John P. Anthes, Phil Garcia, Joe T. Pierce. Non-scanned LADAR imaging and applications[C]. *SPIE*, 1993, **1936**: 11~22
- 8 John Sackos, Bart Bradley, Carl Diegert. Scannerless terrain mapper[C]. *SPIE*, 1996, **2810**: 144~153
- 9 Colin L. Smithpeter, Robert O. Nellums, Steve M. Lebien. LADAR measurements of the international space station[C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 65~72
- 10 Phil Garcia, John Anthes, Joe T. Pierce. Characterization of a scannerless LADAR system[C]. *SPIE*, 1993, **1936**: 23~30
- 11 Colin L. Smithpeter, Robert O. Nellums, Steve M. Lebien. A miniature high-resolution laser radar operating at video rates[C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 279~286
- 12 Lü Hua, Su Jiangzhong. Scannerless 4D imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(suppl.): 202~205  
吕 华,苏建忠. 无扫描四维激光成像技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(增刊): 202~205
- 13 Yan Huimin, Ni Xuxiang, Chen Qilin. Study of scannerless laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9): 861~864  
严惠民,倪旭翔,陈奇霖. 无扫描三维激光雷达的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9): 861~864
- 14 S. E. Moran, B. L. Ulich, W. P. Elkins. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance[C]. *SPIE*, 1997, **3173**: 430~457
- 15 Lian Minlong, Wang Shitao. Research on the imaging performance of space low light level imaging system based on ICCD[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, **28**(3): 6~10  
练敏隆,王世涛. 基于 ICCD 的空间微光成像系统成像性能研究[J]. *航天返回与遥感*, 2007, **28**(3): 6~10
- 16 Zuo Fang, Liu Guangrong, Gao Zhiyun. Performance analysis of low light level image sensors: BCCD, ICCD, EBCCD[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, **22**(1): 109~112  
左 昉,刘广荣,高稚允. 用于微光成像的 BCCD, ICCD, EBCCD 性能分析[J]. *北京理工大学学报*, 2002, **22**(1): 109~112