

增益调制激光雷达弱信号的双阈值处理分析

靳辰飞^{1,2}, 胡鹏², 张思琦², 刘丽萍², 赵远², 谭立英¹

(1. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:在远距离弱信号条件下,增益调制激光雷达系统的测距精度受到强背景噪声的严重干扰。为了提高系统的测距精度,从系统基本工作原理出发,对增益图像进行双阈值化处理,得出了测距误差最小的阈值条件;考虑到阈值处理对目标与背景存在错误判断,结合增益调制像的概率分布函数定义了增益像和距离像的错误率函数。选取距离分别为 1 930 m 和 1 940 m 的两座建筑物作为目标进行成像实验。实验结果表明:双阈值化处理后,系统的测距偏差减小了 58.3%,从而验证了双阈值化处理的可行性。通过对目标与背景实验结果的计算发现,目标距离的错误率存在极小值。

关键词:激光雷达; 弱信号; 增益调制; 双阈值; 错误概率

中图分类号: TN938.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2447-06

Analysis of weak signal processing of gain-modulated laser radar with double thresholds

Jin Chenfei^{1,2}, Hu Peng², Zhang Siqi², Liu Liping², Zhao Yuan², Tan Liying¹

(1. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The characteristics of gain-modulation laser radar images seriously affected by noise in the condition of long distant and weak signal were studied. For the purpose of improving the ranging precision, the processing method with double thresholds was proposed on the basis of the basic principle of the laser radar system. The minimum ranging error equation was obtained from the basic operation principle of gain-modulation laser radar. Considering faulty judgments between target and background with double thresholds processing method, the error probability functions were defined for gain-modulated images and range images. Two buildings at the distance of 1 930 m and 1 940 m were selected as targets for an outdoor experiment. The results show that distance error was reduced by 58.3%; the feasibility of double thresholds processing method was proved. On the other hand, the results show the error probability on double thresholds has a minimum.

Key words: laser radar; weak signal; gain-modulated; double thresholds; error probability

收稿日期: 2013-12-09; 修订日期: 2014-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61102147); 中国博士后科学基金(20100481004); 中央高校基本科研业务费专项资金(2011012)

作者简介: 靳辰飞(1979-), 男, 副教授, 主要从事激光雷达、光电信号检测等方面的研究。Email: jinchenfei@hit.edu.cn

0 引言

ICCD 是一种高灵敏度、高像元密度、超快速度的微光成像器件^[1]。近年来,基于 ICCD 阵列器件的三维无扫描成像激光雷达以其高分辨率、高帧频、大视场成像的优点迅速得到了人们的广泛关注^[2-3]。增益调制型三维无扫描成像激光雷达^[4-5]是这类成像体制的一种典型代表。由于这类系统利用激光器的泛光照射目标,在远距离条件下得到的增益强度像的信噪比极低,目标强度起伏很大,信号强度与背景强度几乎等量级,目标的特征信号受到背景噪声的严重干扰。而通过图像处理的方法去提高测距精度确实是成像激光雷达的关键技术之一^[6]。目前,针对远距离弱信号条件下对三维无扫描成像激光雷达两幅增益图像处理的研究还很少。文中以测距误差和错误概率为评价指标,提出了一种双阈值处理方法来降低强背景对弱信号的干扰。

1 增益调制激光雷达系统的工作原理

增益调制激光三维成像原理^[4-5]如图 1 所示,发射端采用脉冲宽度在 ns 量级的激光器,接收端利用

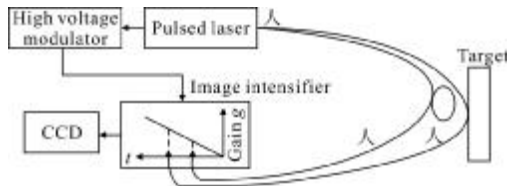


图 1 增益调制三维成像的原理框图

Fig.1 Schematic diagram of gain-modulated laser 3D imaging

ICCD 阵列接收器件接收回波信号。第一个工作周期 ICCD 的增益随时间指数变化,回波脉冲到达像增强器的时刻所对应的增益,和脉冲的往返时间也成指数变化关系,最终在 CCD 上获得指数增益调制下的强度像;第二个工作周期 ICCD 的增益随时间不发生变化,在 CCD 上获得常数增益调制下的强度像。通过对这两幅图像作商,就能将增益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。由于光脉冲很窄,ICCD 的任一成像单元接收到的光脉冲近似用 δ 函数来表示,回波信号的接收功率为:

$$P(\tau) = E\delta(\tau - t) \quad (1)$$

式中: τ 为回波到达接收器的时间; E 为回波单脉冲

能量; t 为脉冲往返的时间延迟。设常数增益为 g_c ,指数增益为 $g(\tau)$:

$$g(\tau) = g_0 e^{(\tau/\tau_e)} \quad (2)$$

式中: g_0 为初始增益值; τ_e 为指数增益调制的时间常数,它决定了增益随时间的变化率。两个 CCD 的探测值分别为:

$$I_V^0 = \int P(\tau)g(\tau)d\tau = E g_0 e^{t/\tau_e} \quad (3)$$

$$I_C^0 = \int P(\tau)g_c d\tau = E g_c \quad (4)$$

式中: I_V 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)。通过测量参量 g_0 、 g_c 和 τ_e 可将 t 解算出来,即:

$$t = \tau_e \ln \left(\frac{g_c I_V^0}{g_0 I_C^0} \right) \quad (5)$$

最终,目标的距离像为:

$$L = \frac{1}{2} c \tau_e \ln \left(\frac{g_c I_V^0}{g_0 I_C^0} \right) \quad (6)$$

ICCD 中的核心部件是像增强器,它对光信号有放大的作用^[7]。当增益调制成像激光雷达探测远距离目标时,目标回波信号经接收孔径到达像增强器的光电阴极能量很小,属于微光量级,输入的光电子数近似服从泊松分布^[8-9],探测器接收到的信号随时间的起伏大,而这种起伏又被像增强器放大,最终导致目标的强度像有很大的噪声起伏;与此同时,强度相当的背景噪声也随信号被像增强器放大,叠加在整个强度像的每个像素点上。具体来说,信号与噪声的特点表现为以下几个方面:(1) 目标的形状、纹理、边缘信息丢失严重,表现为一些孤立点;(2) 目标的回波信号满足泊松分布,起伏大;背景噪声满足高斯分布,起伏较小,是一种缓慢的随机过程。(3) 目标与背景的平均强度相当,SNR 接近 1。远距离弱信号条件下,由于背景噪声对两幅强度像的干扰十分严重,最终必然会影响距离像的测距精度。在考虑背景噪声时,两次 ICCD 上探测值变为:

$$L_V = \int (P(\tau) + P_n)g(\tau)d\tau = I_V^0 + I_{nV} \quad (7)$$

$$L_C = \int (P(\tau) + P_n)g_c d\tau = I_C^0 + I_{nC} \quad (8)$$

式中： I_{nc} 、 I_{nv} 分别为在常数增益和变增益下背景噪声的探测值。由此可得在背景噪声干扰下，目标的距离误差为：

$$\Delta L = \frac{1}{2} c \tau_e \left| \ln \left[1 - \frac{I_{nv}^0 I_{nc} - I_c I_{nv}^0}{I_v (I_c + I_{nc})} \right] \right| \quad (9)$$

2 增益调制像的双阈值化处理

2.1 距离误差与阈值的关系

为了减小目标的测距误差，笔者试图对两幅增益像进行阈值化处理，即通过将两幅像的强度值分别减去背景噪声的本底 K_{nc} 、 K_{nv} 的方法来削减背景噪声的探测值 I_{nc} 、 I_{nv} 对目标距离误差的影响，从而使 I_c^k 、 I_v^k 更接近于目标的实际信号。

$$I_v^k = I_v - K_{nv} \quad (10)$$

$$I_c^k = I_c - K_{nc} \quad (11)$$

通过对两幅强度像都作阈值化处理，可以得到目标的距离误差为：

$$\Delta L(K_{nc}, K_{nv}) = \frac{1}{2} \times c \tau_e \left| \ln \left[1 - \frac{(I_v - I_{nv})(I_{nc} - K_{nc}) - (I_c - I_{nc})(I_{nv} - K_{nv})}{(I_v - I_{nv})(I_c + I_{nc} - K_{nc})} \right] \right| \quad (12)$$

当 K_{nc} 、 K_{nv} 满足以下的线性关系时，测距误差为最小：

$$(I_v - I_{nv})(I_{nc} - K_{nc}) = (I_c - I_{nc})(I_{nv} - K_{nv}) \quad (13)$$

2.2 距离像的误判率函数

常数增益和变增益下背景噪声和信号的探测值都是随机变量，存在较大的随机起伏，而笔者设定的阈值是确定的，所以处理后的图像中不免存在一些信号像素点由于强度较低而被误判为噪声而被除去，同样也存在一些噪声信号点由于强度较大而被误判为信号而被保留。在此，定义误判率函数：

$$P(k) = \alpha(1 - F_n(k) + F_i(k)) \quad (14)$$

式中： $F_n(k)$ 、 $F_i(k)$ 分别为背景区域和目标区域探测强度值的概率分布函数； α 为归一化常数。

在背景区域和目标区域的探测概率密度曲线图中，误判率 $P(k)$ 函数可由阈值两侧对应曲线下的面积之和来表示。具体到两幅增益图像中，由于增益函数的不同，常数增益和指数增益下背景噪声和信号

的探测值服从不同的概率分布(见图 2、图 3)。假设这两种图像的初始增益 g_0 与 g_c 近似相等，则在指数增益下得到的强度像中信号强度与背景噪声强度的比值要大于恒增益的情况，导致背景区域与目标区域探测强度的概率分布函数交叠区域较小。因而，指数增益像的误判率要低于常数增益像。

由于距离像是由指数增益像和常数增益强度像相除后解算出来的，两幅像中任何一幅图像中的某个像素点被误判都会导致最终距离值计算的错误，由此，笔者可以定义距离像的误判率函数：

$$P_D(K_{nc}, K_{nv}) = 1 - (1 - P_c(K_{nc}))(1 - P_v(K_{nv})) \quad (15)$$

式中： $P_c(K_{nc})$ 、 $P_v(K_{nv})$ 分别为常数和指数增益强度像的误判率函数。

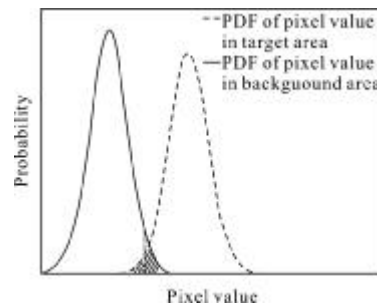


图 2 阈值处理后指数增益调制像中的错误概率
Fig.2 Error probability of exponential gain image after threshold processing

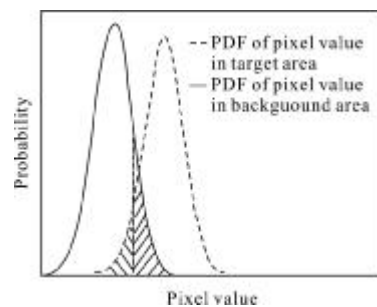


图 3 阈值处理后常数增益调制像中的错误概率
Fig.3 Error probability of constant gain image after threshold processing

3 实验及分析

为了验证增益调制型激光雷达的测距原理，研究距离像的测距误差 $\Delta L(K_{nc}, K_{nv})$ 和误判率函数 $P_D(K_{nc}, K_{nv})$ 随阈值 K_{nc} 、 K_{nv} 的变化规律，笔者选取距离分别为 1 930 m 和 1 940 m 的两座建筑物作为探测

目标,进行了外场实验,得到目标在常数增益和指数增益调节下的强度像。实验得到的增益图像如图 4 所示。

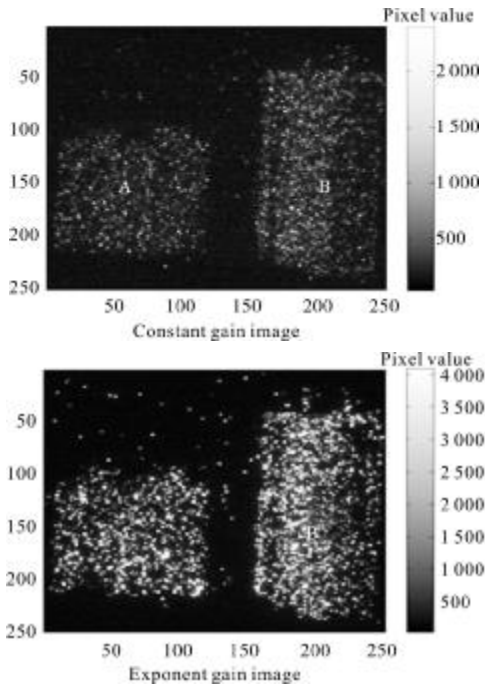


图 4 恒增益和指数增益下得到的增益强度像

Fig.4 Gain images in condition of constant gain and exponent gain

3.1 实验结果的初步分析

笔者先将两幅增益像的不同区域进行分割处理,提取目标 A、B 以及背景区域,再对各个区域的强度值进行初步统计,图 5、图 6 是 A 目标以及背景

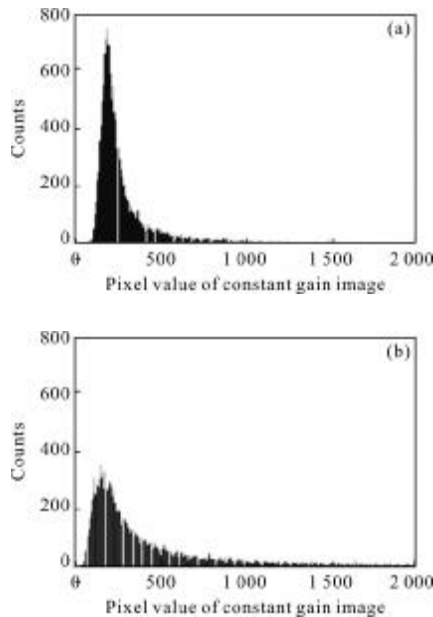


图 5 图像在目标区域的统计直方图

Fig.5 Statistical histograms of target region

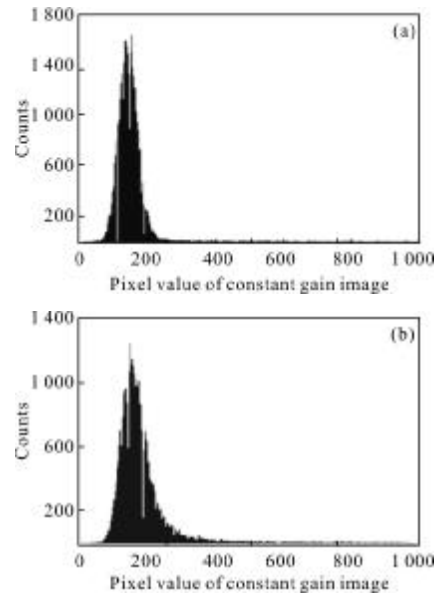


图 6 图像在背景区域的统计直方图

Fig.6 Statistical histograms of background region

的统计的结果。表 1 是两幅增益像中不同区域的强度均值的统计结果。

表 1 两幅增益像中不同区域的强度均值

Tab.1 Intensity mean of different regions of two gain images

Mean value	Target A	Target B	Noise area
Constant gain image	285.78	270.55	144.025
Exponent gain image	960.89	1 221.51	213.63

在常数增益像中目标与背景在统计直方图中强度峰值都在 200 附近,噪声的强度与信号的强度相当,但在指数增益像中,目标区域强度的峰值在 500,背景区域强度峰值在 200 左右。这是由于目标区域信号的增益决定于脉冲往返的飞行时间,而背景噪声的强度随时间的变化较小,其增益受飞行时间的影响较小。

比较 A、B 两个区域发现,常数增益像中两个目标区域的强度相差不大,而在指数增益像中,A、B 目标的强度相差达到 260。这是由于 B 目标的距离较 A 远,B 目标区域的脉冲返回时间较 A 目标晚,被接收系统放大的倍数更大。

3.2 距离像的测距误差随阈值 $\Delta L (K_{nc}, K_{nv})$ 、 K_{nc} 、 K_{nv} 的变化规律

在常数增益和变增益下背景噪声和信号的探测值都是随机变量,存在较大的随机涨落。为了研究距

离像的测距误差 $\Delta L(K_{nc}, K_{nv})$ 随阈值 K_{nc} 、 K_{nv} 的变化规律, 对两种增益下各区域的探测强度均值代入公式(6)进行解算, 测得目标的距离和测距误差结果如图 7、8 所示。

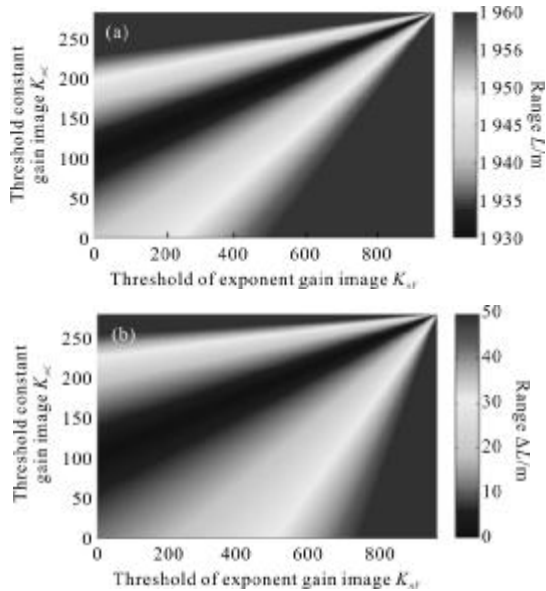


图 7 目标 A 的距离和测距误差结果

Fig.7 Range and ranging error result of target A

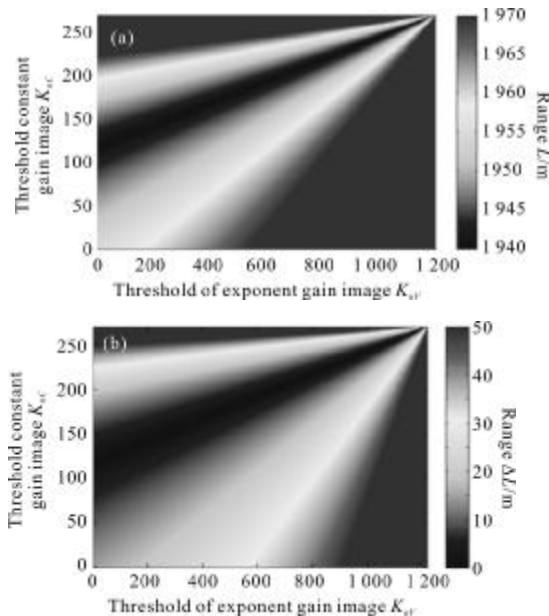


图 8 目标 B 的距离和测距误差结果

Fig.8 Range and ranging error result of target B

由图 7、8 的结果发现, 测距误差相等的点都在同一条直线上。不难看出, 当 K_{nc} 、 K_{nv} 都等于对应增益像中背景噪声区域的强度均值时, 测距误差存

在极小值。

笔者以背景噪声的强度均值对两幅增益像进行阈值化处理, 得到的距离像如图 9 所示。通过对比不难看出, 经过双阈值处理后, 很多目标点的距离信息丢失, 但两座建筑物的颜色有了较明显的区分, 阈值处理后距离像的测距误差降低了。

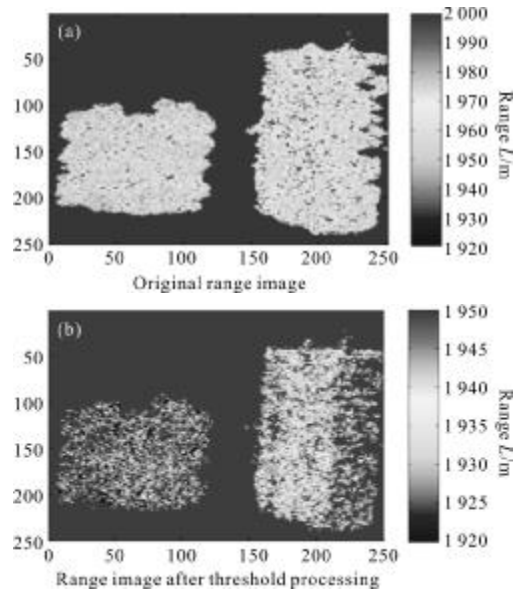


图 9 目标的距离像

Fig.9 Ranging images of targets

笔者对距离像的两座建筑物的有效像素点提取后计算距离均值和标准差, 表 2 为统计结果。统计结果表明, 经过双阈值处理后, 系统的测距偏差减小了 58.3%, 单幅距离像的测距误差减小了 53.3%。

表 2 阈值处理后距像的统计结果

Tab.2 Statistical result of depth image with double thresholds

Statistical result		Target A	Target B
Original image	Mean range/m	1 941.8	1 953.3
	Range bias/m	11.8	13.3
	Range rms/m	14.8	15.4
After threshold processing	Mean range/m	1 934.9	1 945.1
	Range bias/m	4.9	5.1
	Range rms/m	6.7	7.3

3.3 距离像的错误率 $P_D(K_{nc}, K_{nv})$ 随阈值 K_{nc} 、 K_{nv} 的变化规律

笔者将 3.1 中得到的关于目标 A 及背景在常数

增益和指数增益下的统计结果分别代入公式(14)中,归一化常数 $\alpha=0.5$,计算得到这两幅增益像中 A 目标的错误概率,如图 10 所示。将 $P_c(K_{nc})$ 和 $P_v(K_{nc})$ 代入公式(15)可以得到距离像的错误率 $P_D(K_{nc}, K_{nv})$,如图 11 所示。

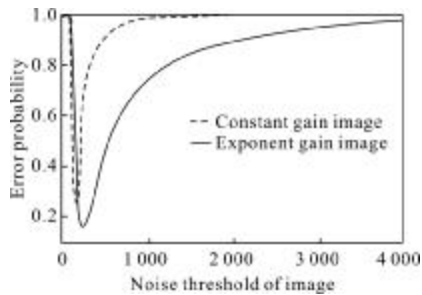


图 10 两种增益图像中错误概率随噪声阈值的变化

Fig.10 Variation of gain error probability with noise thresholds in two kinds of gain images

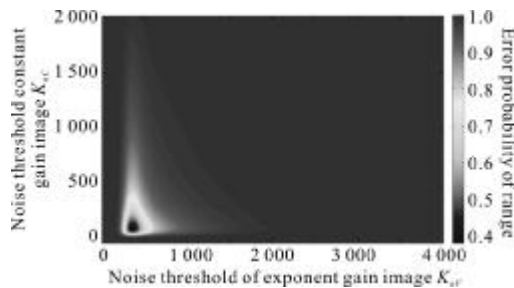


图 11 距离像的错误概率随噪声阈值的变化

Fig.11 Variation of gain error probability of depth image with noise thresholds

从图 10 可知,常数增益像和指数增益像的错误概率均存在一个极小值点,对应的阈值分别为 179 和 242。此外,当阈值超过极小值点继续增大的过程中,相比指数增益图像,常数增益图像的错误概率急剧上升。这是由常数增益像中目标区域和背景噪声区域强度值概率分布函数相互叠加的面积较大导致,与之前的分析相一致。在距离像的错误率函数图像中,错误率存在的极小值点,对应指数增益图像的噪声阈值为 357.1,常数增益图像的噪声阈值为 131。

4 结论

增益调制激光雷达系统在远距离弱信号条件下得到的增益像受背景噪声污染严重,测距精度受到

很大的影响。通过双阈值处理的方法确实可以起到滤除背景噪声提高系统测距精度的目的。但是,设定双阈值只有在近似满足最小误差方程时才能很好地起到滤除噪声的目的。如果阈值选取不当,会引入更大的测距误差。此外,双阈值的选取不当还会影响到距离像的错误概率。

参考文献:

- [1] Zuo Fang, Liu Guangrong, Gao Zhiyun, et al. Performance analysis of low light level image sensors: BCCD, ICCD, EBCCD [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(1): 109-112. (in Chinese)
- [2] Li Dong, Yang Huajun, Zheng Qiuzhen, et al. Application of range-gated technology in the three-dimensional imaging laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 85-88. (in Chinese)
- [3] Vaidyanathan M, Joshi A, Xue S. High performance lidar focal plane arrays for 3D range imaging[J]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 1253: 1776-1781.
- [4] Jin Chenfei, Sun Xiudong, Zhao Yuan, et al. Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3550-3552.
- [5] Jin Chenfei, Zhao Yuan, Zhang Yong, et al. Scannerless three-dimensional imaging using a pulsed laser and an intensified charge-coupled device with linearly modulated gain[J]. Applied Optics, 2009, 48(19): 3823-3829.
- [6] Yang Chao, Yan Huimin, Zhang Xiuda, et al. Improvement of ranging accuracy of imaging laser radar with sectioned restoration method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1206-1211. (in Chinese)
- [7] Bai Xiaofeng, Yin Lei, Hu Wen, et al. Repetitive characteristic of image intensifier's luminance gain [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 495-498. (in Chinese)
- [8] Emmett J Ientilucci. Synthetic Simulation and Modeling of Image Intensified CCDs (ICCD) [M]. MD: The College of Science Rochester Institute of Technology, 2000.
- [9] Wang Jiapeng, Wang Shurong, Song Kefei, et al. Image noise suppression and performance evaluation of ICCD[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2008, 19(8): 1032-1038. (in Chinese)