

doi: 10.3788/gzxb20164501.0110003

基于增益调制的激光成像准确度研究

屠志鹏, 李思宁, 张大勇, 陆威

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要:微通道板电压与增益对数理论上呈线性关系, 为了更接近实际情况, 根据已知的微通道板电压与增益对数的函数关系选取一组线性数据点, 并在其基础上加一组随机数作为波动, 得到新的电压与增益对数的关系, 获得指数拟合公式, 用于还原目标的距离信息. 对成像准确度进行理论分析, 结果表明成像准确度与系统信噪比和增益调制函数有关, 且信噪比越高, 距离准确度越高. 测量了微通道板增益与电压的关系曲线, 在不同电压条件下照射同一距离同一目标得到回波图像, 利用不同电压下回波图像灰度值之比得到相对增益之比. 分别在恒定增益和调制增益下, 对距离成像系统 60m 的目标进行成像, 利用增益曲线对所得的图像进行处理, 准确还原出目标的距离信息, 准确度达到分米量级.

关键词:激光成像; 距离选通; 增益调制; 非线性增益; 距离准确度

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0110003-5

The Accuracy Research on Gain Modulation Laser Imaging

TU Zhi-peng, LI Si-ning, ZHANG Da-yong, LU Wei

(Department of Optoelectronic, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The relationship of the gain logarithm and voltage of microchannel plate is linear in theory. In order to be closer to the actual situation, according to the known function between the voltage and logarithmic gain of microchannel plate, a set of linear data points added random numbers were selected, and the new relationship of the voltage and logarithmic gain was obtained which can be used to restore the target distance information. The analysis results of imaging accuracy show that the imaging accuracy is related to the system's signal noise ratio and gain modulation function, the higher signal noise ratio is, the higher the distance accuracy is. The relationship between the gain and the voltage of microchannel plate was measured. The echo images in different voltages conditions were obtained by illuminating the same target at the same distance, the gray value ratio of the echo images under different voltages was used to get the ratio of relative gain. Respectively under the condition of constant gain and modulation gain, the target which was 60 m far from the imaging system was imaged. By using the gain curve, the obtained images were processed and the distance information of target accurately was restored, the distance accuracy could reach decimeter magnitude.

Key words: Laser imaging; Range gated; Gain modulation; Nonlinear gain; Distance accuracy

OCIS Codes: 100.3008; 100.2980; 010.3310; 290.1350; 110.4280

0 引言

距离选通激光成像属于主动成像, 可以克服传统被动成像的许多缺点, 具有成像清晰、对比度高、不受环境光源的影响等优点. 根据距离选通成像的原理, 可以区分目标反射光和后向散射光, 从而有效克服大气

后向散射对成像距离和成像质量的影响, 提高成像质量和分辨率^[1]. 增益调制激光成像是距离选通成像的一种, 不同距离对应不同的增益, 利用恒定增益和调制增益下所成的像可以还原目标的距离信息.

丹麦国防研究所的 Andersen 等在 2004 年对目标进行了距离选通切片成像, 成功实现了目标的三维重

基金项目: 海军十二五预研一测风雷达资助课题

第一作者: 屠志鹏(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光成像. Email: hit_tuzhipeng@163.com

导师(通讯作者): 李思宁(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光成像雷达. Email: siningli@sina.com

收稿日期: 2015-07-17; 录用日期: 2015-10-29

<http://www.photon.ac.cn>

构,其距离准确度达到毫米量级^[2].瑞典国防研究机构运用距离选通技术获得目标的强度像和距离信息,实现了水下三维成像^[3].日本NHK工程技术服务部的Kawakita等利用超快激光脉冲实现了相机的超短时间曝光,用增益调制技术取代了原先的强度可调光源,对静止的目标进行了成像,增益函数为线性函数时成像的距离准确度达为2.4 mm^[4].天津航物理技术研究所的吕华等研究了增益调制算法原理,设定增益函数为线性函数,成功地分辨出了不同距离的目标^[5].哈尔滨工业大学的赵远等对增益调制激光雷达测距准确度进行了理论分析,并通过实验验证了增益调制测距的可行性^[6-11].另外,研究者们针对水下成像实验^[12]、主动成像系统^[13-14]和其他增益调制实验^[15]以及成像评价参量进行了研究^[16].

由于现有研究都是基于线性增益的,本文选取与实际情况更接近的非线性增益作为调制增益,对成像准确度进行了分析,并搭建了成像系统,利用所搭建的系统测量了增益曲线,完成了成像实验,对成像实验结果进行处理.经过简单的滤波后,利用所形成的算法还原距离信息,得出该系统的距离准确度.

1 理论分析

1.1 增益调制激光成像基本原理

增益调制通过控制电压来调节微通道板(Microchannel Plate, MCP)增益,让MCP的电压在其电压扫描范围内随时间由小变大,不同的回波时间将对应不同的增益值.第一次在恒定增益下成像,对目标范围内的所有距离,回波脉冲增益相同,此时图像只包含强度信息.第二次在调制增益下成像,对不同的距离,回波脉冲的增益也将不同,此时图像包含强度和距离信息.利用获得的两幅像可以去除强度信息,获得目标的距离信息.

图1为增益调制成像时序图,其中 τ_t 为发射脉冲宽度, τ_r 为回波脉冲的宽度,激光在传输和反射时脉宽会受到一定的影响. P_r' 为回波脉冲的功率, T_s 为激光

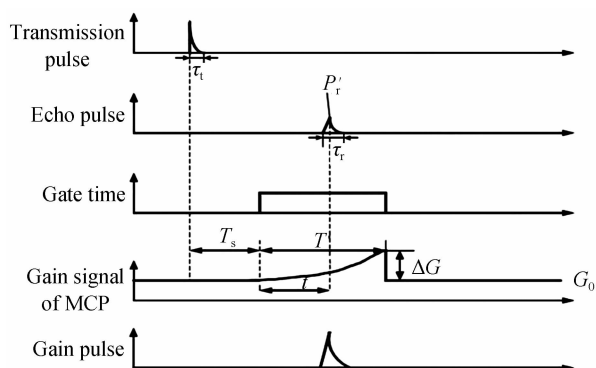


图1 增益调制成像时序图

Fig. 1 Gain modulation imaging sequence diagram

发射时间和选通门开启时间的间隔, T 为选通门打开时间, G_0 为起始增益值, ΔG 为增益变化值.

首先激光器对目标发射出一个激光脉冲,选通门在预先设定的时间后打开,回波脉冲进入成像系统,在选通门打开的这段时间内电压控制系统控制MCP的增益,使其在这段时间里持续变化.回波脉冲有一定宽度,从起始端到末端的增益都不相同,这样就对进入MCP的回波脉冲进行了变化增益.计算机记录其强度像后,调节MCP使其在选通门打开的时候增益保持恒定,回波脉冲从起始端到末端所获得的增益都相同.用计算机记录恒定增益图像,通过对这两幅图像的强度信息处理可以得到目标的距离信息.

设增益波形在变化阶段时增益与时间的关系函数为

$$G = g(T)G_0 \quad (1)$$

因此相对增益函数为变化的增益与初始增益的比值,即

$$g(T) = \frac{G}{G_0} \quad (2)$$

那么在增益调制情况下得到的图像灰度值为

$$A = P_r' \tau_r g(t) G_0 \quad (3)$$

在增益恒定的情况下得到的图像灰度值为

$$B = P_r' \tau_r G_0 \quad (4)$$

式(3)与式(4)相除可得

$$g(t) = \frac{A}{B} \quad (5)$$

因为增益函数曲线 $g(t)$ 已知,则可以求出对应的时间 t ,然后根据图1中的波形图可求出距离,即

$$R = \frac{c}{2} (T_s + t) \quad (6)$$

由式(5)可见求解距离时需要的信息是两种情况下获得的图像灰度值以及该时刻的相对增益值.

若增益函数为线性函数,即

$$G = \left(1 + \frac{\Delta G}{T G_0} t\right) G_0 \quad (7)$$

那么根据计算所得的距离公式为

$$R = \frac{c}{2} \left(T_s + \frac{G_0 T}{\Delta G} \left(\frac{A}{B} - 1 \right) \right) \quad (8)$$

1.2 增益调制成像准确度分析

增益调制是一种间接获取距离像的方式,成像过程分成两步,首先是对回波脉冲的调制过程,分别在恒定增益情况下和增益调制情况下对目标成强度像;然后在解算时将两幅强度像相除后根据增益函数获取距离信息.

距离准确度的误差来源为噪声误差,背景噪声的加入影响了获得图像的强度的准确性从而影响了所测的距离准确度,通过研究噪声分布模型,运用数字图像处理中的图像去噪技术对所获的图像进行预处理来减

少噪声的影响,计时器和增益脉冲的延时也会造成误差,需要计算出平均延迟时间,在实际中减去这一段时间.激光脉冲被大气展宽,会对传播过程中大气折射率的变化有一定影响,对于纳秒级的脉冲影响相对较小.

在计算距离信息时,根据强度像相除得到的相对增益数据需要增益曲线一一对应时间信息,因此增益调制函数给出的增益数据需要和成像时实际 MCP 对回波脉冲的增益值相一致.

根据所得的距离公式可知,增益函数的准确性也会影响成像的距离准确度,因此需要测量成像系统的增益特性,拟合出合适的增益函数,同时恒定增益和增益调制时所测得的强度像精确性将影响到成像的距离准确度.

成像测量方差可以通过测量统计学公式计算,即

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2 \left[\frac{g(t)}{g'(t)}\right]^2 \left(\frac{\sigma_B^2}{B^2} + \frac{\sigma_A^2}{A^2}\right) \quad (9)$$

式中 $g(t)$ 为 t 时刻的增益, $\frac{\sigma_B}{B}$ 和 $\frac{\sigma_A}{A}$ 为激光回波能量探测误差,即恒定增益成像和增益调制成像的信噪比,将公式进行简化可得

表 1 电压与增益实测数据

Table 1 The measured data of voltage and gain

Voltage/V	260	291	326	359	392	425	457	491	522	553	583	614
Gain	1	1.3415	2.1320	3.5811	6.3097	11.739	21.126	38.725	67.966	119.82	197.84	354.11
Voltage/V	643	672	701	730	757	785	812	839	866	892	918	
Gain	541.02	925.81	1333.5	2003.1	3257.3	4764.3	6803.3	9654.5	13396	18707	25255	

增益值, U 为电压值,拟合所得的函数为

$$G = 1299000 \exp \left[- \left(\frac{U - 1601}{344.1} \right)^2 \right] \quad (11)$$

拟合结果如图 2.

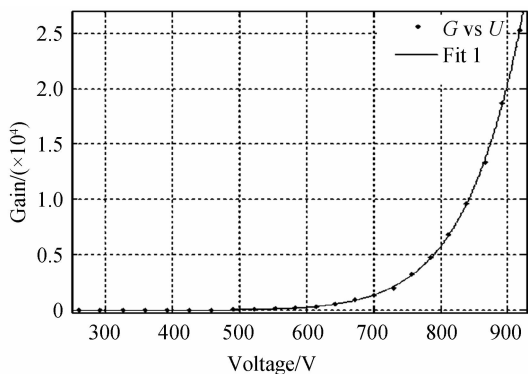


图 2 电压和增益关系曲线

Fig. 2 The relationship curve of voltage and gain

3 增益调制成像实验

如图 3,成像实验目标为两块材质相同的木板,目标放置在距离成像系统 60 m 处,通过调整两块木板间

$$\delta_R = \frac{c}{2} \frac{g(t)}{g'(t)} \left(\frac{1}{\text{SNR}_A^2} + \frac{1}{\text{SNR}_B^2} \right)^{1/2} \quad (10)$$

从式(10)中可以看出距离选通增益调制成像的距离准确度和成像系统的信噪比有关,信噪比越高距离准确度越高,同时还和增益调制函数有关.

2 MCP 增益曲线测量

为了减少噪声干扰,该增益电压曲线测试实验在黑暗的室内进行.激光器作为光源发出功率稳定的激光光束,调节电压控制器的电压使图像传感器 (Charge-Coupled Device, CCD) 能获得肉眼可见灰度值较低的图像,定义此时的外加电压为电压初始值,记录初始值下的图像灰度值.渐渐增加电压,记录相应的图像灰度值,当增益使得 CCD 相机采集的图像趋近饱和时增加衰减片并继续增加电压,为了保护电路,所加的高压不应超过 1 000 V.用 Matlab 求出图像的总像素值,图像的像素值总和正比于图像强度,因此可以用来计算 MCP 得相对增益.

对表 1 中的电压和增益进行拟合,定义 G 为相对



图 3 成像目标

Fig. 3 The imaging target

的距离来分析增益调制成像的距离准确度.

在夜晚对距离为 60 m 的两块木板像进行了成像实验,为了验证距离准确度,将两块目标平行放置,木板间隔从 1.5 m 到 0.05 m 变化,激光器前安装凸透镜使光斑均匀地照射目标,计算机记录了不同间隔的恒定增益目标像和调制增益目标像,成像结果如图 4.

从图 4 可以看出,恒定增益成像时两块木板的亮度较接近,增益调制成像时后一块木板的亮度明显大于前一块木板的亮度,说明不同的距离相机对成像目标的增益大小不同.

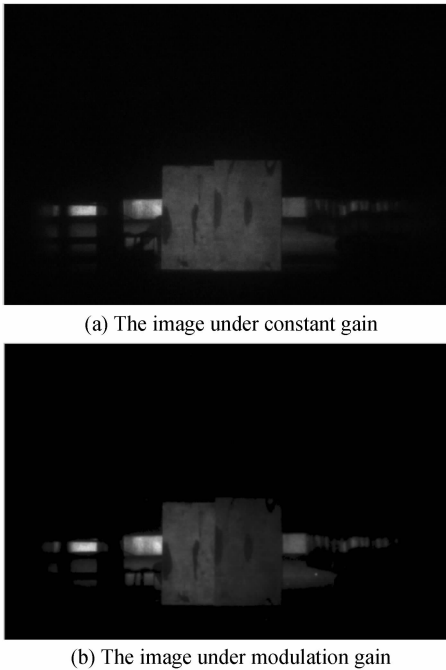


图4 平行成像结果

Fig. 4 The imaging results of the two parallel boards

4 实验结果数据处理

将所获得的两幅图像导入到 Matlab 中进行阈值分割和滤波处理。

根据增益调制求距离信息的算法,计算增益调制强度像上的每个像素值与恒定增益所成的强度像上每个像素值之比,得出目标上每一点的增益信息.式(11)给出了相对增益与电压的函数关系和上升区间电压与时间的函数关系,在取值区间内这两组函数都为单调函数,所以存在反函数,即电压与相对增益函数为

$$U = 1601 - 344.1 \sqrt{-\log \frac{G}{61490}} \quad (12)$$

将相对增益信息带入式(12)就可以计算出 MCP 上的加载电压信息,然后根据时间与电压的函数

$$t = 135.5 - 171.6 \sqrt{-\log \frac{U}{868.3}} \quad (13)$$

用 Matlab 分别对间隔不同的每组强度像进行数值计算,得到目标的距离信息,目标距离像如图 5。

由图 5 可以看出,增益调制激光成像可以很准确地还原两个平板的距离,当两平行木板相距 0.9 m 时,其相对距离也能被清楚地看出。将距离像中第 320 行的距离值取平均,来作为这两块木板的距离,得到的距离分别为 58.91 m 和 59.86 m,与实际距离相差很小。当两平行木板相距 0.3 m 时,仍能较清楚地分出两木板。再将距离像中第 320 行的距离值取平均,得到的距离分别为 58.89 m 和 59.13 m,与 0.3 m 的实际相距距离之间存在 20% 的误差,仍能分辨两木板。但当两木板间距为 0.1 m 时,已经很难分辨两木板,相距距离误

差将达到 50% 以上,所以,最终的距离准确度可达到分米量级。

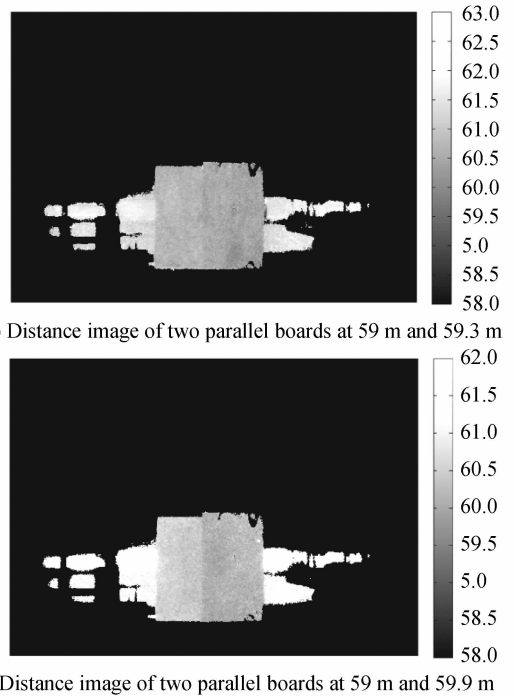


图5 目标的距离像

Fig. 5 Distance images of the target

5 结论

本文将与实际更接近的非线性增益作为调制增益,分析了成像准确度.利用所搭建的激光成像系统,测量了 MCP 的增益特性,拟合了增益特性曲线,完成了对距离 60 m 处目标的增益调制成像实验,获得了恒定增益和调制增益下的目标像,根据增益调制算法和增益特性曲线进行了数据处理,获得了目标的距离像,可准确还原目标距离信息,成像距离准确度可达到分米量级。

参考文献

- [1] ZHU Xiao-peng, LIU Ji-qiao, HE Yan, *et al.* Range gated imaging lidar at wavelength of 532 nm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 358-362.
竹孝鹏,刘继桥,贺岩,等. 532nm 激光距离选通成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2012,**41**(2): 358-362.
- [2] ANDERSEN J F, BUSCK J, IA H H. Long distance high accuracy 3-D laser radar and person identification[C]. SPIE, **2005**: 5791:9-16.
- [3] KLASSEN L, ANDERSSON P, LARSSONH, *et al.* Aided target recognition from 3-D laser radar data[C]. SPIE, 2004, **5412**: 321-332.
- [4] MASAHIRO K, KEIGO I, REI I, *et al.* Gain-modulated axi-vision camera (high speed high-accuracy depth-mapping camera)[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(3): 5336-5344.
- [5] SU Xin, JIA Xiao-dong, LÜ Hua, *et al.* Design of image process platform and research of imaging arithmetic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(s): 638-642
苏鑫,贾晓东,吕华,等. 无扫描凝视成像系统图像处理平台设计及成像算法研究[J]. *红外与激光工程*, 2010,**39**(s): 638-

642.

- [6] ZHAO Yuan, XU Yuan-nan, JIN Chen-fei. Gain modulation of scanning laser radar ranging accuracy of theoretical analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 313-317.
赵远, 许元男, 靳辰飞, 等. 增益调制非扫描激光雷达测距准确度的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, **38**(2): 313-317.
- [7] ZHANG Yong, CAO Xi-bin, WU Long, *et al.* Influence of linear gain modulation lidar system parameters on range accuracy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(4): 925-929.
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 线性增益调制激光雷达系统参量对测距准确度的影响[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(4): 925-929.
- [8] JIN Chen-fei, ZHAO Yuan, ZHANG Yong, *et al.* Experimental research on a scannerless 3D imaging laser radar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(6): 1383-1387.
靳辰飞, 赵远, 张勇, 等. 一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究[J]. 中国激光, 2009 (6): 1383-1387.
- [9] HE Jiang. Theoretical and experimental research on gain modulating scannerless imaging lidar [D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2007.
何姜. 增益调制型无扫描成像激光雷达的原理与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] LI Si-ning, LIU Yan, ZHANG Fan-hui, *et al.* Simulation research of laser three-dimensional imaging system based on range gated technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(s2): 331.
李思宁, 刘妍, 张繁辉, 等. 距离选通激光三维成像系统的仿真研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(s2): 331.
- [11] JIN Chen-fei, HU Peng, ZHANG Si-qi, *et al.* Analysis of weak signal processing of gain-modulated laser radar with double thresholds [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(8): 2447-2452.
靳辰飞, 胡鹏, 张思琦, 等. 增益调制激光雷达弱信号的双阈值处理分析[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(8): 2447-2452.
- [12] YANG Shu-bin, PENG Fu-yuan. Design and experiment of an underwater laser imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(s2): 75-78.
杨述斌, 彭复员. 水下激光成像系统设计及实验[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(s2): 75-78.
- [13] LI Quan, LIU Ze-jin, SHU Bo-hong, *et al.* Scheme design for range gated laser imaging system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(1): 33-36.
黎全, 刘泽金, 舒柏宏, 等. 主动成像系统距离选通实验方案设计[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(1): 33-36.
- [14] YUAN Pu-sheng, LIU Qi. Non-scanning 3-D range-gated imaging lidar experimental system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(2): 147-150.
原蒲升, 刘琦. 无扫描 3-D 距离选通成像激光雷达实验系统 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, **3**(2): 147-150.
- [15] LÜ Hua, SU Jian-zhong. Scannerless 4D imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(s1): 470-473.
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**(s1): 470-473.
- [16] DAI De-de, SUN Hua-yan, HAN Yi, *et al.* Image quality assessment of laser active imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(9): 986-990.
戴得德, 孙华燕, 韩意, 等. 激光主动成像系统目标图像质量评价参量研究 [J]. 激光与红外, 2009, **39**(9): 986-990.