

线性增益调制激光雷达系统参数对测距精度的影响

张 勇^{1,2}, 曹喜滨¹, 吴 龙², 赵 远²

(1. 哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 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: 测距精度是激光雷达系统的重要参数, 测距精度影响因素的研究对于提高激光雷达系统性能具有重要价值。增益调制无扫描激光雷达是一种新体制的激光雷达, 其测距精度的影响因素不同于传统飞行时间测量的激光雷达系统。从增益调制激光雷达距离表达式出发, 推导了增益调制激光雷达各系统参数对于距离精度的影响, 综合考虑了 ICCD 的调制误差、回波强度较低时的光子噪声、探测器噪声、微通道板的增益饱和等因素, 给出了测距精度与回波功率的关系曲线。得出增益调制无扫描激光雷达系统存在一个回波强度区间, 在该强度区间内, 无扫描激光雷达的测距精度是区间外的 2 倍以上。

关键词: 成像系统; 无扫描激光雷达; 增益调制; 增益饱和; 距离精度

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0925-05

Influence of linear gain modulation lidar system parameters on range accuracy

Zhang Yong^{1,2}, Cao Xibin¹, Wu Long², Zhao Yuan²

(1. The Satellite Technology Academy, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Department Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Range accuracy is one of the most important parameters in a radar system. Research on the influence of range accuracy has an important value to improve the laser performance of radar. As a novel lidar system, linear gain modulation scannerless lidar acquires range information from image intensity by using the technique of range-intensity mapping. The relationship between range resolution and lidar system parameters was under investigated, taking different factors into consideration, including the modulation error of ICCD, the photonic noise at low echo intensity, the detector noise, and the gain saturation of micro channel plate. This paper presents that, within a certain region of echo signal power, range resolution can be improved by over twice that of outside the region, leading to great improvements of lidar system performance.

Key words: imaging system; scannerless lidar; gain modulation; gain saturation; range accuracy

收稿日期: 2012-08-11; 修订日期: 2012-09-15

基金项目: 中央高校基本科研业务专项资金(HIT.KLOF.2010048)

作者简介: 张勇(1979-), 男, 博士, 主要从事光电探测、激光成像方面的研究。Email: zzyyyy@hit.edu.cn

0 引言

增益调制型无扫描激光雷达具有成像速度快,图像分辨率高、结构紧凑等优点,因而备受关注。1992 年美国 Sandia 公司提出了采用正弦波调制的增益调制性激光雷达的概念,并在 1994 年研制出了样机^[1-2]。1994-2004 年间在美国空军和陆军实验室的配合下进行了大量的外场实验研究,为了提高其作用距离,将其照明的激光器从连续调制的半导体激光阵列升级成了大功率的固体脉冲激光器,获得了 1 km 的作用距离和 6 inch(1 inch=2.54 cm)的距离分辨率的优异性能^[3-4]。此外,吕华在 2010 年给出了线性增益调制激光雷达的成像实验结果^[5],随后靳辰飞对系统进行了改进,提出了指数增益调制的改进系统^[6]。2010 年,张秀达提出了脉冲形状无关的增益调制激光雷达系统,并对其进行了研究^[7]。

线性增益调制是增益调制的代表,因此,以线性增益调制激光雷达作为研究对象,并讨论系统存数对于距离分辨率的影响。

1 工作原理

线性增益调制系统是由大功率脉冲激光器、可调制增益的选通型 ICCD、同步控制延时电路、高压调制器和图像采集处理部分组成。其增益时序图如图 1 所示。通过对 ICCD 的增益进行线性调制,由于不同距离的目标回波时间不同,因而不同回波时间将对应着不同的增益。回波时间早对应低增益,回波时间晚对应高增益,最后对增益调制下的灰度像与横增益时的灰度像进行解算,从中得出目标的距离信息^[5]。

设具体参数如下:A 为变增益帧得到的灰度值,B 为恒定增益帧得到的灰度值,P 为激光器的峰值

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_2}{P_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\Delta G_c}{G_c}\right)^2} \quad (5)$$

由于 $\Delta A/A$ 和 $\Delta B/B, \Delta P_1/P_1$ 和 $\Delta P_2/P_2, \Delta G/G$ 和 $\Delta G_c/G_c$ 产生误差的物理机制和过程基本相同,因此可以认为它们分别是相同的,上式可简化为:

$$\frac{\Delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\Delta k}{k}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta G_0}{G_0}\right)^2} \quad (6)$$

由公式(6)出发,逐项分析各系统参数对于激光

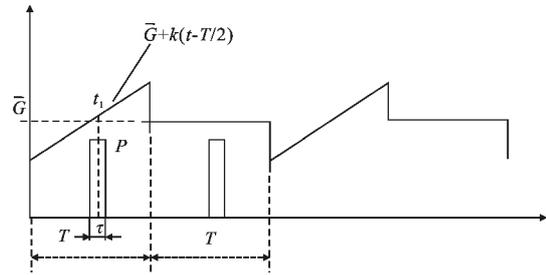


图 1 线性增益调制系统的增益时序图

Fig.1 Linear Gain Modulation System timing diagram

功率, τ 为激光脉冲的宽度, k 为增益变化率, M 为系统的常数因子, G 为变增益帧的平均增益, G_c 为恒定增益帧的常数增益, 则变增益灰度值:

$$A = \int_{t_1 - \frac{\tau}{2}}^{t_1 + \frac{\tau}{2}} P_1 G k t M dt = P_1 M \tau G k t_1 \quad (1)$$

恒定增益灰度值:

$$B = \int_{t_1 - \frac{\tau}{2}}^{t_1 + \frac{\tau}{2}} P_2 G_c M dt = P_2 G_c M \tau \quad (2)$$

通过解算作用距离:

$$R = \frac{c}{2k} \left(\frac{A}{B} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{G_c}{G} \right) \quad (3)$$

2 系统参数对于距离分辨率的影响

线性增益非扫描激光雷达的距离如公式(3)所示。根据公式(3)可知,增益调制斜率 k , 灰度值 A 和 B , 回波光强 P_1, P_2 和增益 G, G_c 都对距离值有影响,这相对于扫描激光雷达要复杂得多。将公式(3)进行微分,则有:

$$\Delta R = \Delta \left(\frac{c}{2k} \cdot \frac{A}{B} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{G_c}{G} \right) \quad (4)$$

距离相对误差为:

雷达系统距离分精度的影响。

2.1 调制精度的影响

增益调制斜率 k 是预先设计的系统参数,通过控制微通道板两端的电压信号实现微通道板增益调制。然而电压信号不可能做到完全没有波动,因此就会对增益调制精度带来影响。假设电压调制信号为

U(t),则增益变化关系为:

$$G(t) = \left(\frac{4U(t)}{34\alpha} \right)^{\frac{\alpha}{4}} \quad (7)$$

式中:G(t)为微通道板增益;α为微通道的长径比。由于在微通道板静态工作条件下,长径比α存在一个最佳值,使微通道板增益最大,因此,对于大多数微通道板α的值约为40^[8]。

对公式(7)两端取微分可得:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\alpha}{4} \frac{\Delta U(t)}{U(t)} \quad (8)$$

将 α=40 W 代入公式(7),则有:ΔG/G=10ΔU(t)/U(t)。也就是增益的精度要比电压的精度低一个量级。调制精度对于测距精度的影响如图 2 所示。

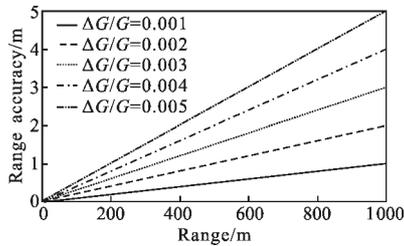


图 2 调制精度对测距精度的影响曲线

Fig.2 Relationship between ranging accuracy and modulation accuracy

由图 2 可知,在相同的调制精度下,测量距离越远,测距精度越差。测距精度随着调制精度的增加而增加,二者呈线性变化。通常函数发生器的信号精度能够达到 0.5%,则增益调制斜率 ΔG/G=5%,增益调制的斜率精度 Δk/k ≈ 5%。由于调制斜率与激光回波功率无关,因此,无论激光回波为多少,调制斜率对于精度的影响总是存在的。

2.2 灰度值 A、B 的影响

A 和 B 是 ICCD 读出的调制增益帧和恒定增益帧的灰度值,造成其误差的原因主要是 ICCD 系统的噪声引起的。根据 ICCD 的信噪比定义则有:

$$\frac{\Delta A}{A} \approx \frac{1}{SNR} \quad (9)$$

ICCD 由像增强器和 CCD 组成,CCD 带来的噪声很小,其信噪比能够达到 60 dB,因此,CCD 带来的影响主要在于数字化过程中的舍入误差引起的噪声。而像增强器的噪声包括光电阴极噪声,微通道板噪声,荧光屏噪声。信噪比对测距精度的影响如图 3 所示。

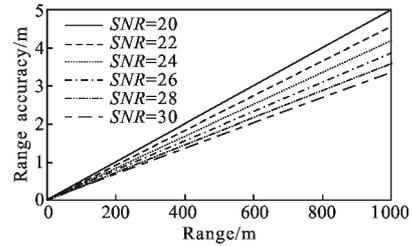


图 3 信噪比对测距精度的影响曲线

Fig.3 Relationship between ranging accuracy and SNR

由图 3 可知,系统的测距精度随着信噪比的提高而提高,但不是线性关系。像增强器经过几十年的发展目前已经出现三代产品,虽然通过工艺和材料的改进像增强器灵敏度有了较大提高,但是信噪比并没有多少提高。目前,美国的第三代像增强器信噪比仅能够达到 30,而其他国家使用的二代像增强器信噪比也只能达到 20 左右。因此,ΔA/A 的范围在 3%~5%左右。由于灰度值的起伏与灰度值的商仅受探测器信噪比的限制,而与其他系统参数无关,因此,无论激光回波强度如何变化,该项的影响也是一直存在的。

2.3 回波强度造成的起伏影响

由于增益调制系统采用泛光场照射,激光被分散到各个单元,每个单元接收到的能量很小,光子本身的起伏和光电阴极光电转换过程中的量子起伏成了制约系统的主要因素,其概率统计可以描述为:

$$P_n(n) = \frac{(aPT)^n}{n!} e^{-aPT} \quad (10)$$

因此,公式(3)中 P₁ 和 P₂ 在经过光电阴极后产生的电子数为 P₁(n)和 P₂(n)。

根据统计理论 ΔP/P 为:

$$\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

式中:n 为公式(3)中 P₁ 和 P₂ 对应的光子数。

仅考虑回波功率随作用距离变化,作用距离与测距精度的关系曲线如图 4 所示。

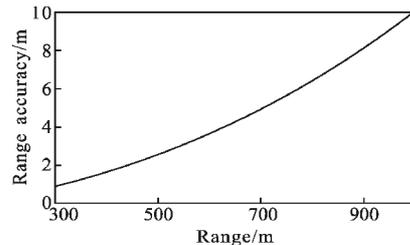


图 4 回波强度对测距精度的影响曲线

Fig.4 Relationship between ranging accuracy and echo signal intensity

如图 4 所示,探测器接收到的激光回波强度起伏是与激光回波强度有关的,回波功率越大,回波的相对起伏就越小,对系统精度的影响也越小。当作用距离较远,回波功率较弱时回波起伏的影响会非常明显。

2.4 微通道板增益饱和和影响

在增益调制激光雷达系统理论分析中,通常将 ICCD 中的微通道板作为一个线性的电流放大器进行分析,并未考虑到微通道板增益是与输入信号相关的,并不是一个固定值,因而,对于系统参数对测距精度的分析是不足的。增益调制激光雷达系统为了实现一定的测距精度,通常要求较高的信噪比,如参考文献[1]中要求的信噪比为 20,参考文献[9]中要求的信噪比为 1000,根据公式(11),可以得到其输入的光子数要求在 400 以上,此时,微通道板的增益将偏离设定值,从而对系统测距精度产生影响。

ICCD 中的微通道板是提供增益的主要元件,在应用中经常认为微通道板增益与输入信号是相互独立的,但实际情况二者却是有关的,微通道板输入电流与输出电流关系如下^[10]:

$$i(t) = i_0(t) \exp \left(GN - \frac{k}{q_D} e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{RC}} i(\tau) d\tau \right) \quad (12)$$

式中: $i(t)$ 为微通道板输出电流; $i_0(t)$ 为微通道板输入电流; $G = k \ln(V_D/V_C)$; $q_D = CV_D$; $V_D = V_{MCP}/N$, V_C 和 k 是微通道板倍增过程的两个常数, V_{MCP} 是微通道板两端电压; N 是电子倍增次数; R 和 C 是微通道的等效电阻和等效电容。微通道板增益可写为 $G = i(t)/i_0(t)$,令 $G_0 = \exp(GN)$,则公式(10)可简化为:

$$G = \frac{G_0}{\exp \left(\frac{k}{q_D} e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{RC}} i(\tau) d\tau \right)} \quad (13)$$

对于脉冲情况,脉冲宽度 τ 远小于微通道板 RC 常数时,公式(11)可简化为:

$$G = \frac{G_0}{1 + \frac{kG_0}{CV_D} \int_0^t i_0(\tau) d\tau} \quad (14)$$

由公式(12)可知,随着回波光强的增加,微通道板的增益是降低的。这将导致微通道板增益偏离预设的理论值,从而导致系统距离精度降低。

$$\text{令 } N = \frac{kG_0}{CV_D} \int_0^t i_0(\tau) d\tau, \text{ 则有:}$$

$$\frac{\Delta G}{G} = \sqrt{(5\%)^2 + \left(\frac{N}{1+N} \right)^2} \quad (15)$$

当回波光强较小,即 $N \ll 1$ 时, $(N/(1+N^2))$ 可以忽略不计,但是当光强较大时,探测器增益下降带来的影响就不能忽略了。以美国 Sandia 公司在 1996 年采用 BigSky 公司的脉冲固体激光器和 Kodak 公司的三代 ICCD 的实验系统为例,按照公式(15)计算可得,此系统工作过程中 $N=0.09$,这时增益饱和对于系统增益造成的偏离影像已经比较明显,必须考虑其结果对最终测距精度的影响。

2.5 系统各参数对精度的影响

以上分析了增益调制激光雷达系统各参数对系统距离精度影响的过程,由于这些影响的机制和强弱不同,最终表现出的结果也不同,下面将综合考虑这些影响过程。

以笔者搭建的线性增益调制激光雷达为例:激光波长为 532 nm,脉冲宽度为 10 ns,ICCD 的像增强器直径为 25 mm,微通道直径为 12 μm ,CCD 像元数为 256 \times 256,ICCD 整体信噪比为 25,增益调制电源起伏为 0.5%。以回波光强为变量,无量纲的相对测距精度与回波光强的关系曲线如图 5 所示。

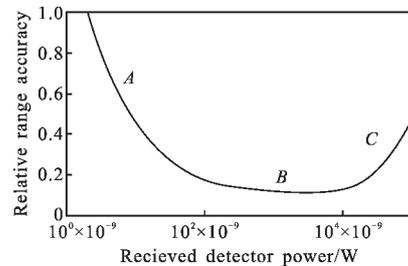


图 5 相对测距精度和激光回波强度对数关系曲线

Fig.5 Relationship between the relative ranging accuracy and laser echo signal intensity

由图 5 可知,回波光强与系统测距精度的关系可分为 3 段来分析。

(1) 当回波功率从零逐渐增大时(对应于曲线的 A 段),非扫描激光雷达系统的距离精度随着光强增大而增加。其原因是回波较弱时,回波光子起伏影响最为突出,成为制约系统距离精度的瓶颈,而增益调制精度、系统信噪比和增益饱和的影响体现不出来,随着光强增加,回波光子起伏减小,系统测距精度也增加。

(2) 当光强增加到一定程度时(对应曲线的 B 段),非扫描激光雷达的距离精度基本不随回波强度的变化而改变,同时该区域的距离精度也是最佳的。其原因是增益调制精度、系统信噪比成为了系统距离精度的瓶颈,由于二者与回波光强无关,因此表现出距离精度不随回波强度变化的趋势。该区间的相对测距精度趋近于 0.1,而在 A 段和 C 段最高的相对测距精度也在 0.2 以上,因此,该区间的相对测距精度是其他区间的 2 倍以上。

(3) 继续增加回波强度时(对应曲线 C 段),非扫描激光雷达距离精度随着激光光强的增加而下降。其物理机制是 ICCD 出现了增益饱和现象,实际增益与理论增益出现了偏差,导致系统距离精度下降。综上所述,对于增益调制激光雷达系统存在一个距离精度不随回波强度变化的区域,并且该区域的距离精度是最优的,因此,在设计非扫描激光雷达时,使其尽可能工作在这一区域,以获得较好的距离精度。此外,该区域影响距离精度的主要因素是系统的增益调制之精度和系统成像信噪比,因此,提高系统测距精度可以采用精度更高的调制电源和信噪比更高的 ICCD,或者采用多次累积的方法,提高累积结果的调制精度和成像信噪比。美国 Sandia 实验室采用调幅连续波测距在现有 ICCD 信噪比条件下达到英寸级距离精度主要就是通过调幅信号多周期累积这一方法实现的。

3 结论

文中讨论了线性增益调制激光雷达系统的基本原理,分析了系统调制精度、灰度值、回波强度等各项因素对于系统测距精度的影响,并在此基础上,综合考虑了各参数对于测距精度的影响,确定了线性增益调制无扫描激光雷达最优测距精度所对应的接收功率范围。处于最优探测器功率下的测距精度可高于其他区间 2 倍以上。这一结论对于提高无扫描激光雷达系统的测距精度具有重要价值。

参考文献:

- [1] Sackos J T, Nellums Robert O, Lebien S M, et al. A low-cost high-resolution video resolution imaging optical radar [C]//SPIE, 1998, 3380: 327-342.
- [2] Anthes J P. Non-scanned LADAR imaging and applications [J]. Applied Laser Radar Technology, 1993, 1936: 11-22.
- [3] Habbit Jr R D, Nellums R O. Utilization of flash lidar for cooperative and uncooperative rendezvous and capture [C]// SPIE, 2003, 5088: 146-157.
- [4] Bassan Michele, Giudicotti Leonardo, Pasqualotto R, et al. Simple analytical model of gain saturation in microchannel plate devices[J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(1): 247258.
- [5] Lv Hua, Su Jiangzhong. Scannerless 4D imaging technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S): 202-205. (in Chinese)
吕华,苏建忠. 无扫描四维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 202-205.
- [6] Jin C, Sun X, Zhao Y, et al. Gain-modulated 3D active imaging with depth-independent depth accuracy [J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3550-3552.
- [7] Zhang Xiuda, Yan Huimin, Jiang Yanbing. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy[J]. Optics Letters, 2008, 33: 1219-1221.
- [8] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Low-light-level and Infrared Image Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
张敬贤,李玉丹,金伟奇. 微光与红外成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [9] Zhang Xiuda. Studies on the new three-dimensional active optical imaging theory and system [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
张秀达. 新型三维主动光学成像理论与系统研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
- [10] Feller W B. The dynodized microchannel plate model and secondary electron emission[J]. Electron Devices, 1985, 32(11): 2479-2481.