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:增益调制非扫描激光雷达是一种新体制的激光雷达,其测距精度的研究具有重要价值。从增益调制激光雷达距离表达式出发,研究了增益调制激光雷达各系统参数对于距离精度的影响关系,综合考虑了回波强度较低时的光子噪声和距离精度较高时微通道板的增益饱和带来的影像,给出了测 距精度与回波功率的关系曲线,得到了增益调制无扫描激光雷达系统存在一个回波强度区间,通过调整系统参数控制回波强度在该区间内,可以保证系统获得最高的测距精度。 关键词:成像系统; 非扫描激光雷达; 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(2014)05-1458-05

Influence of linear gain modulation lidar system parameters on ranging accuracy

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

Satellite Technology Academy, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
 Physics Department, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Gain modulation scannerless lidar is a new system of lidar. It is significant to investigate the range resolution of the lidar system. Based on the gain modulation lidar distance expression, the relationship between gain modulation lidar system parameters and range accuracy is being under investigation. Both photon noise with the weak echo intensity and gain saturation of the microchannel plate with the high range accuracy were taken into account. Curve between ranging accuracy and echo power was given. Gain modulation scannerless lidar system has a interval of echo power. By adjusting parameters to manipulate echo power into this interval, the highest ranging accuracy can be obtained. Key words: imaging system; scannerless lidar; gain modulation; gain saturation; ranging accuracy

收稿日期:2013-09-19; 修订日期:2013-10-03

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

增益调制型非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公里的作用距离和6英寸的距离分辨率的优异 性能^[3-4]。此外,吕华^[6]在 2010 年给出了线性增益调 制激光雷达的成像实验结果,随后靳辰飞^[6]对系统进 行了改进,提出了指数增益调制的改进系统。2010年, 张秀达^[7]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。

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

1 线性增益调制激光雷达的工作原理

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。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 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。为恒定 增益帧的常数增益,则变增益灰度值为:

$$\mathbf{A} = \int_{t_1-\frac{\tau}{2}}^{t_1+\frac{\tau}{2}} \mathbf{P}_1 \mathbf{G} \mathbf{k} t \mathbf{M} dt = \mathbf{P}_1 \mathbf{M} \tau \mathbf{G} \mathbf{k} t_1$$
(1)

恒定增益灰度值为:

$$\mathbf{B} = \int_{t_1 - \frac{\tau}{2}}^{t_1 + \frac{\tau}{2}} \mathbf{P}_2 \mathbf{G}_c \mathbf{M} dt = \mathbf{P}_2 \mathbf{G}_c \mathbf{M} \tau$$
(2)

通过解算作用距离为:

$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{c}}{2\mathbf{k}} \left(\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} \cdot \frac{\mathbf{P}_2}{\mathbf{P}_1} \cdot \frac{\mathbf{G}_c}{\mathbf{G}} \right)$$
(3)

线性增益调制系统的增益时序图如图1所示。



图 1 线性增益调制系统的增益时序图 Fig.1 Linear gain modulation system timing diagram

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表达式由公式(3)给出。根据公式(3)可知,增益调制斜率k,灰度 值A和B,回波光强P₁、P₂和增益G、G_c都对于距离 值有影响,这相对于扫描激光雷达要复杂的多。将公 式(3)进行微分则有:

$$\Delta \mathbf{R} = \Delta \left(\frac{\mathbf{c}}{2\mathbf{k}} \cdot \frac{\mathbf{A}}{\mathbf{B}} \cdot \frac{\mathbf{P}_2}{\mathbf{P}_1} \cdot \frac{\mathbf{G}_c}{\mathbf{G}} \right)$$
(4)

距离相对误差为:

$$\frac{\Delta \mathbf{R}}{\mathbf{R}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathbf{k}}{\mathbf{k}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{A}}{\mathbf{A}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{B}}{\mathbf{B}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{P}_1}{\mathbf{P}_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{P}_2}{\mathbf{P}_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{G}}{\mathbf{G}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mathbf{G}_c}{\mathbf{G}_c}\right)^2} \tag{5}$$

由于 $\Delta A/A$ 和 $\Delta B/B$ 项, $\Delta P_1/P_1$ 和 $\Delta P_2/P_2$ 项, $\Delta G/G$ 和 $\Delta G_c/G_c$ 项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:

$$\frac{\Delta \mathbf{R}}{\mathbf{R}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \mathbf{k}}{\mathbf{k}}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \mathbf{A}}{\mathbf{A}}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \mathbf{P}_1}{\mathbf{P}_1}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta \mathbf{G}_0}{\mathbf{G}_0}\right)^2}$$
(6)

由公式(6)出发,逐项分析各系统参数对于激光

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 制的。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

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

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:

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

将 α=40 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。





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,二者成线性变化。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 $\Delta G/G=5\%$,增益调制的斜率精度 $\Delta k/k \approx 5\%$ 。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,造成其误差的原因只要是由于ICCD 系统的噪声引起的。根据ICCD的信噪比定义则有:

$$\frac{\Delta A}{A} \approx \frac{1}{SNR}$$
(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。





由图 3 可知,系统的测距精度随着信噪比的提高而提高,提高的关系并不是线性关系。像增强器经过几十年的发展目前已经发展出三代产品,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够达到 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,而与其它系统参数无关,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:

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

因此,这里 P_1 和 P_2 变为代表光电阴极后的电子数。

根据统计理论 $\Delta P/P$ 为:

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

式中:n为 P_1 和 P_2 对应的光子数。

仅考虑回波功率随作用距离变化情况下,作用 距离与测距精度的关系曲线。

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。



Fig.4 Relationship between the ranging accuracy and echo signal intensity

2.4 微通道板增益饱和影响

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 距精度的分析是存在不足的。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]:

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{i}_0(t) \exp\left(\mathbf{GN} - \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{q}_D} e^{-\frac{\mathbf{t}}{\mathbf{RC}}} \int_0^t e^{\frac{\tau}{\mathbf{RC}}} \mathbf{i}(\tau) d\tau\right) \qquad (12)$$

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; $G=kln(V_D/V_C)$, $q_D=CV_D$, $V_D=V_{MCP}/N$, 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;

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{G}_{0}}{\exp\left(\frac{\mathbf{k}}{\mathbf{q}_{D}} e^{-\frac{\mathbf{t}}{\mathbf{R}C}} \int_{0}^{t} e^{\frac{\tau}{\mathbf{R}C}} \mathbf{i}(\tau) \mathrm{d}\tau\right)}$$
(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:

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

笔者令 N=
$$\frac{\mathbf{kG}_0}{\mathbf{CV}_D} \int_0^{\infty} \mathbf{i}_0(\tau) \mathrm{d}\tau$$
则有:
$$\frac{\Delta \mathbf{G}}{\mathbf{G}} = \sqrt{(5\%)^2 + \left(\frac{\mathbf{N}}{1+\mathbf{N}}\right)^2}$$
(15)

当回波光强较小也就是 N≪1 时,因此(N/1+N²) 可以忽略不计,但是当光强较大时,探测器增益下降 带来的影响就不能够忽略了。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像。

2.5 系统各参数对精度的影响

前述分析了增益调制激光雷达系统各系统参数 的对系统距离精度影响的过程,但由于这些影响的 机制和强弱不同,因此最终表现出的结果也不同,下 面将综合考虑这些影响过程。

以作者搭建的线性增益调制激光雷达为例:激 光波长 532 nm,脉冲宽度 10 ns,ICCD 的像增强器直 径 25 mm, 微通道直径 12 μm,CCD 像元数为 256× 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。





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三段:



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, 使其尽可能的工作在这一区域,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:

- Sackos J T, Nellums Robert O, Lebien S M, et al. A Lowcost high-resolution video resolution imaging optical radar [C]//SPIE, 1998, 3380: 327-342.
- [2] Anthes J P. Nonscanned LADAR imaging and applications
 [C]//SPIE, Applied Laser Radar Technology, 1993, 1936: 11-22.
- [3] Robert D, Habbit Jr, Robert O Nellums. Utilization of flash ladar for cooperative and uncooperative rendezvous and capture[C]//SPIE, 2003, 5088: 146-157.
- [4] Michele Bassan, Leonardo Giudicotti. Simple analytical model of gain saturation in microchannel plate devices [C]//SPIE, 2006, 2006: 170-175.
- [5] Lv Hua, Su Jiangzhong. Scannerless 4D imaging technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 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. (in Chinese)
- [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 Imaging Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [9] Zhang Xiuda. Study on the Theroy and System of New 3 dimensional Active Optical Imaging [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [10] Giudicotti L, Bassan M. The dynodized micro channel plate model and secondary electron emission [J]. American Institute of Physics January, 1994, 32: 247-258.