

近距离收发同轴激光测距精度研究

高 坡,胡以华,赵楠翔,王 勇

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院),安徽 合肥 230037;
2. 电子制约技术安徽省重点实验室,安徽 合肥 230037)

摘 要: 脉冲激光测距精度是影响二维激光扫描成像质量的重要因素,研究近距离条件下收发同轴系统中的脉冲激光测距技术对提高二维激光扫描成像质量具有重要意义。通过仿真计算分析了脉冲激光测距的精度与回波能量的关系,提出了二维激光扫描成像光学系统的基本设计方案。在室内距离下,提出了在收发同轴光学系统中,到达探测器的激光回波能量相对于距离的非线性关系,计算并得到了激光回波能量相对于距离的非线性关系曲线。最后,基于实测数据对激光回波能量与距离的非线性关系进行实验验证,分析该非线性关系对激光测距精度的影响。论文的研究对设计、完善近距离条件下激光测距光学系统具有重要价值。

关键词: 二维激光扫描成像; 脉冲激光测距; 收发同轴光学系统; 激光回波

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0915-05

Laser ranging precision in sending and receiving coaxial optical system in indoor instance

Gao Po, Hu Yihua, Zhao Nanxiang, Wang Yong

- (1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (Electronic Engineering Institute), Hefei 230037, China;
2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Hefei 230037, China)

Abstract: The precision of pulse laser ranging is the key factor of two-dimensional laser scanning imaging. It is very important to develop pulse laser ranging technology of sending and receiving coaxial optical system in indoor instance to improve the capability of two-dimensional laser scanning imaging. Relationship between the precision of pulse laser ranging and the laser echo energy was analyzed by simulation. The basic design scheme of optical system of the two-dimensional scanning imaging were proposed. In indoor instance, the nonlinear relationship between the laser echo energy and range of sending and receiving coaxial optical system was calculated and the nonlinear curve between the laser echo energy and range was delineated. Finally, the nonlinear relationship was verified by the actual test data and the effect of the nonlinear relationship on the precision of pulse laser ranging was analyzed. The study of thesis has important value in the design of system of laser ranging and the conclusion can be

收稿日期:2013-07-10; 修订日期:2013-08-11

基金项目:国家自然科学基金(61271353)

作者简介:高坡(1988-),男,硕士生,主要从事微弱光信号检测与处理方面的研究。Email:skl_gaopo@163.com

导师简介:胡以华(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事空间信息和光电信息处理方面的研究。Email:skl_hyh@163.com

applied to perfect the design of optical system of pulse laser ranging in indoor instance.

Key words: two-dimensional laser scanning imaging; pulse laser ranging; sending and receiving coaxial optical system; laser echo

0 引言

二维激光扫描成像技术是一种基于激光测距的主动式二维空间信息获取技术。二维激光扫描成像已经广泛应用在工业安全监控系统、汽车防撞系统、广场人流量检测等领域中。脉冲激光测距因其结构简单、体积小、重复频率高等优点,常用于二维激光扫描成像系统中^[1]。

在传统的脉冲激光测距系统中,主要研究集中于解决目标本身的反射特性对测距的影响^[2-4],主要的研究是通过改变系统的电路接收方式来减小目标反射率对测距的影响,基本方法有“固定阈值、恒比定时”等往返时间判别方式^[5-7]。对于光学系统本身设计对测距影响的研究还是比较少的。

通过实验研究发现^[8],在近距离脉冲激光测距中应用收发同轴光学系统时,激光回波能量相对距离的“线性度”将发生严重变化。

1 脉冲激光测距的精度与回波能量关系

飞行时间测距法又称 TOF(Time-of-Fly)^[9],其基本原理是根据发射波信号与回波信号之间的时间间隔,即激光脉冲从激光器到待测目标之间往返时间 t ,就可以算出待测目标的距离 L 为:

$$L = \frac{1}{2} c \cdot t \tag{1}$$

式中: c 为大气中光的传播速度。目前比较常用的时刻鉴别方法主要有两种:固定阈值和恒比定时。基本原理如图 1、图 2 所示。

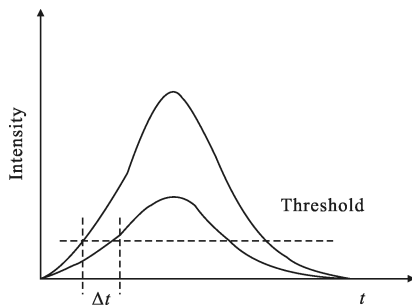


图 1 固定阈值原理

Fig.1 Principle of constant threshold

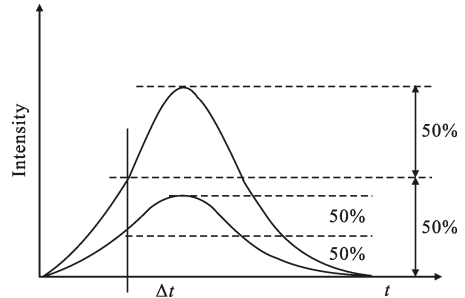


图 2 恒比定时原理

Fig.2 Principle of constant fraction discriminator

图 1 是通过固定阈值的方式来确定起止时刻,可以看出,这种时刻鉴别方式会产生 Δt 的时间误差。图 2 是恒比定时原理电路图解,恒定比值此处取 50%,即取上升沿的半高点为到达时刻,理论误差为零^[9]。此方式虽然能减小目标反射特性对时刻鉴别产生的影响,但对回波形状的要求非常高。

2 收发同轴光学系统中距离精度与激光回波能量的关系

2.1 收发同轴光学系统设计

图 3 是二维激光扫描成像系统中光学系统设计结构图,脉冲激光器发出的激光经过准直镜与两面 45°反射镜反射后照射目标。经目标反射后的激光回波原路返回,再经望远镜会聚到探测器上。

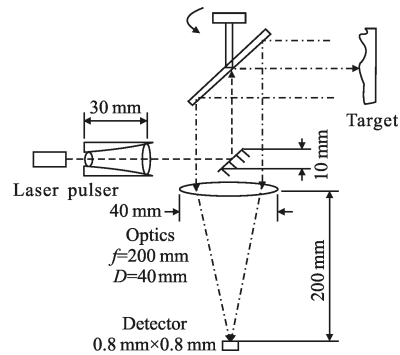


图 3 二维激光扫描成像系统

Fig.3 Two-dimensional laser scanning imaging system

图 4 为激光回波接收部分等效光路图, f 是焦距, r 是探测器光敏面半径, R_2 是透镜半径。

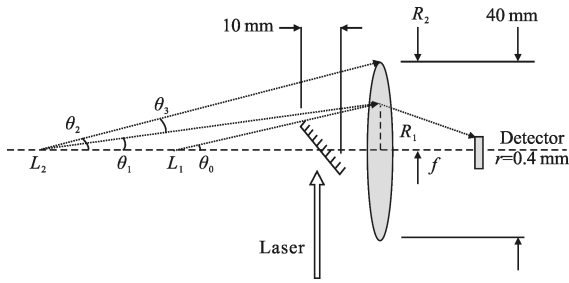


图 4 接收光路 1

Fig.4 Receiver channel 1

其接收视场:

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{r}{f}\right) = \arctan\left(\frac{0.4}{20}\right) \approx 0.02^\circ \quad (2)$$

根据几何光学对应关系:

$$\frac{R_1}{L_1} = \frac{r}{f} \quad (3)$$

由于目标距离远大于反射镜与望远镜的间距, 于是有:

$$R_1 \approx \cos 45^\circ \cdot 5 \text{ mm} \approx 3.54 \text{ mm} \quad (4)$$

$$L_1 = \frac{R_1 \cdot f}{r} = \frac{3.54 \cdot 200}{0.4} \approx 1.77 \text{ mm} \quad (5)$$

在接收视场内, 由于反射镜的遮挡, 小于距离 L_1 的反射光将不能被探测器接收。当被测目标处于 $\theta_2 \approx \theta_0$ 位置处, 视场内的光线恰好能照射到望远镜的边缘上, 如图 4 所示。此时, 只有处于角 θ_3 内的激光回波能到达探测器。

$$L_2 = \frac{R_2 \cdot f}{r} = \frac{20 \cdot 200}{0.4} = 10 \text{ m} \quad (6)$$

当被测目标距离 L 介于 L_1, L_2 之间时, 随着被测目标距离的增加将会有更多的光线能够照射到探测器表面上。但随目标距离的增加, 回波光线的能量却在减小, 所以, 在某一位置处一定会存在某一距离 L 使得激光回波能量达到极大值。这就与平时认为的目标距离越远激光回波能量越小的观点不同。

2.2 激光测距精度与回波能量的关系

一般, 光学探测系统接收的激光回波能量与距离的平方成反比关系。但在收发同轴光学系统中, 由于反射镜的遮挡(如图 4 所示), 会对到达探测器的回波能量产生影响。

由公式(5)、(6)得到的距离 L_1 与 L_2 是两个极限值。一般情况下, 近距离条件下目标尺寸远大于激光光斑。此时, 激光的回波能量与距离成平方的反比关系^[2]。

$$P_r = \frac{P_t A_r \tau_o \tau_a^2 \rho}{L^2} \quad (7)$$

式中: P_r 为接收功率; P_t 为发射功率; A_r 为接收光学系统的有效面积; τ_o 为光学系统的透过率; τ_a 为大气的透射率, 对于文中研究对象, 由于距离较近此项可忽略; ρ 为目标表面的反射率。

当被测目标距离 L 介于 L_1, L_2 之间时, 此时角 θ_3 内的回波能量:

$$P_r(L) = P_r \cdot \varphi(\theta) \quad (8)$$

式中: P_r 是不存在反射镜遮挡时到达探测器总的激光回波功率, $\varphi(\theta)$ 是由于反射镜遮挡产生的激光回波衰减系数。目标反射光近似看作为点源, 在距离 L 处:

$$\varphi(\theta) = \frac{\int_{\theta_L}^{\theta_U} I(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta_U} I(\theta) d\theta} = \frac{\sin \theta_{2L} - \sin \theta_{1L}}{\sin \theta_{2L}} \quad (9)$$

$$P_r(L) = \frac{P_t A_r \tau_o \tau_a^2 \rho}{L^2} \cdot \frac{\sin \theta_{2L} - \sin \theta_{1L}}{\sin \theta_{2L}} = \frac{P_t A_r \tau_o \tau_a^2 \rho}{L^2} \left(1 - \sqrt{\frac{R_1^2 \cdot (L^2 + R_2^2)}{R_2^2 \cdot (L^2 + R_1^2)}} \right) \quad (10)$$

当被测目标距离 L 大于 L_2 时, 由于望远镜直径有限, 只有介于角 θ_1 与 θ_L 之间的光线能到达探测器。如图 5 所示。

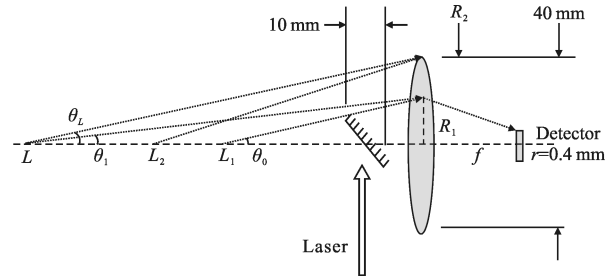


图 5 回波接收光路 2

Fig.5 Receiver channel 2

根据公式(9)、公式(10):

$$\varphi(\theta) = \frac{\int_{\theta_L}^{\theta_U} I(\theta) d\theta}{\int_0^{\theta_U} I(\theta) d\theta} = \frac{\sin \theta_L - \sin \theta_1}{\sin \theta_L} \quad (11)$$

$$P_r(L) = \frac{P_t A_r \tau_o \tau_a^2 \rho}{L^2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{R_1^2 \cdot (L^2 + R_2^2)}{R_2^2 \cdot (L^2 + R_1^2)}} \right) \quad (12)$$

由公式 (12), 到达探测器的归一化激光回波能量随目标距离 $L(L < 15 \text{ m})$ 的变化曲线如图 6 所示。

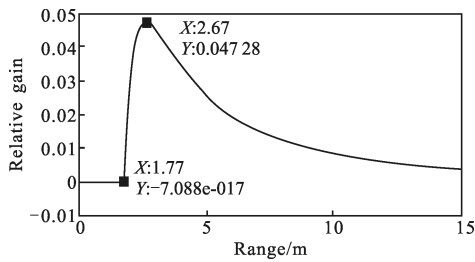


图 6 激光回波强度

Fig.6 Laser echo energy

由图 6 可以看出, 随被测目标距离的增加, 在 1.77 m 之前, 到达探测器的激光回波能量为零, 后急剧增加, 大约在 2.67 m 位置时最强, 之后不断减小。如果采用对回波能量与回波波形要求较高的“固定阈值、恒比定时等”时间鉴别方式时, 这种影响将变得非常严重。

3 收发同轴光学系统中激光回波能量测试

实验中, 目标为漫反射银幕, 目标平面与测距机垂直放置, 二维激光扫描成像测距机设定为定点测量状态。图 7 为应用收发同轴光学系统的二维激光扫描成像测距机与实验场地。

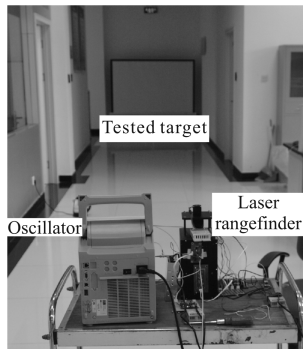


图 7 激光测距实验

Fig.7 Laser ranging and experiment

激光测距机的激光脉冲重频 12 kHz, 脉宽 30 ns。由于文中研究的应用环境仅是室内等近距离条件, 所以被测目标测试距离定为 0~15 m。在测试过程中, 1~10 m 每隔 20 cm 测得一组数据、10~15 m 每隔 40 cm 测得一组数据, 通过示波器读出回波强度值, 取回波信号幅度均值作为不同距离处的回波强度。示波器选用横河 DLM2000, 此示波器能直接给出信号幅度值。测得的激光回波强度相对于目标距离的

变化曲线如图 8 所示, 数据已经经过归一化处理。

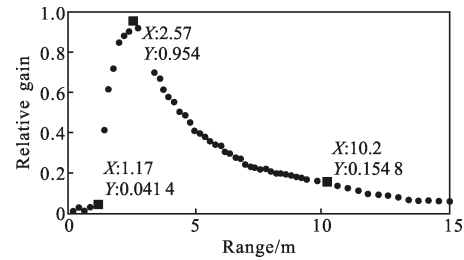


图 8 实测回波强度数据

Fig.8 Actual test data of laser echo energy

由图 8 可以看出, 近距离时存在盲区, 在 1.17 m 位置处测得明显的激光回波信号, 在 2.57 m 时的回波强度最大。这是因为在理论计算时目标的反射光近似看作点源, 而实际上激光经准直后的光斑是有一定面积的, 就出现回波信号相对于理论位置之前就被探测到的现象。而且, 将测得的回波能量曲线趋势图 8 与图 6 的理论值对比, 可以发现实验结果基本符合理论计算的结果。

4 结论

基于脉冲激光测距的成像光学设备将越来越多的应用于工业、安保等领域中。通过对应用收发同轴光学系统的二维激光扫描成像测距机的研究, 结合实验测量得到距离数据, 证实了收发同轴光学系统对激光回波能量的影响。文中给出的结论将影响到二维激光扫描成像系统的方案设计与参数选取, 如: 接收电路动态范围的设计; 回波能量、回波波形调理时, 特殊位置处的激光回波能量处理; 距离标定时算法上特殊位置的数据处理等。对应用收发同轴光学系统的二维激光扫描成像系统设计具有重要的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Ji Rongyi, Zhao Changming, Ren Xuecheng. High precision and high frequency pulse laser ranging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1461-1464. (in Chinese)
纪荣祎, 赵长明, 任学成. 高精度高重频脉冲激光测距系统[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1461-1464.
- [2] Dai Yang, Cheng Xuewu, Li Faquan, et al. Study on the relationship of return power with different reflection model of object in laser ranging[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(3):

- 83-84. (in Chinese)
戴阳, 程学武, 李发泉, 等. 目标反射特性与激光测距回波强度关系的研究[J]. 激光杂志, 2007, 28(3): 83-84.
- [3] Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo, et al. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. *Chinese J Laser*, 2008, 35(7): 1001-1004. (in Chinese)
张雷洪, 杨艳, 臧华国, 等. 目标反射特性对激光测距的影响 [J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1001-1004.
- [4] Jiang Ningyuan, Li Lei. The impact of laser echo waveform of slope on ranging precision [J]. *Wireless Communication Technology*, 2009(3): 55-58. (in Chinese)
姜宁远, 李磊. 倾斜地形回波波波形对测距的影响 [J]. 无线通信技术, 2009(3): 55-58.
- [5] Feng Guoxu, Chang Baocheng. Study of high precision laser ranging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(11): 1137-1140. (in Chinese)
冯国旭, 常保成. 高精度激光测距技术研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(11): 1137-1140.
- [6] Liu Peng, Li Ping, Chen Huimin, et al. Fluctuating threshold circuit based on constant fraction discrimination for pulse laser fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(3): 19-23. (in Chinese)
刘鹏, 栗苹, 陈慧敏, 等. 脉冲激光引信恒比定时浮动阈值电路[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(3): 19-23.
- [7] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473.
- [8] Feng Longling. Method of simulated testing of pulse laser rangefinder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(2): 127-129. (in Chinese)
冯龙龄. 脉冲激光测距系统的仿真检测技术[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 127-129.
- [9] Chen Qiansong, Yang Chengwei, Pan Zhiwen, et al. A brief introduction on development of laser Time-of-Flight distance measurement technology[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(1): 7-10. (in Chinese)
陈千颂, 杨成伟, 潘志文, 等. 激光飞行时间测距关键技术进展[J]. 激光与红外, 2002, 32(1): 7-10.