

文章编号: 1001-3806(2007)04-0408-04

提高激光雷达测距精度的最佳信号门限比

王春勇, 谢俊, 卞保民, 李振华*

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了提高脉冲激光雷达的测距精度, 研究了光束在空域为高斯光束、时域为钟型脉冲的激光雷达在恒电压幅度鉴别模式下, 回波信号幅度变化和宽度变化对测距精度的影响。证明在一定范围内, 由回波幅度变化所造成的测距误差与由回波脉宽变化引起的测距误差, 随鉴别电平的取值不同, 呈现出相反的变化趋势, 即最佳信号门限比的存在, 并导出了相应的计算公式。通过改变接收信号强度, 对不同信噪比、不同信号门限比条件下大量测距实验结果进行了分析, 验证了最佳信号门限比的存在。在一定的实验条件下, 最佳信号门限比的取值在 1.8 附近, 实验结果与理论计算吻合良好。这一研究结果为不同应用条件下, 激光雷达鉴别电平的合理选取提供了依据。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 最佳信号门限比; 测量精度

中图分类号: P225.2 TN958.98 文献标识码: A

Optimum signal threshold ratio for improving the ranging accuracy of lidar

WANG Chun-yong, XIE Jun, BIAN Bao-min, LI Zhen-hua

(Department of Information Physics & Engineering Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract In order to improve the ranging accuracy of a lidar, the effect of amplitude and width of the echo signal on the ranging accuracy of a lidar with bell-type laser pulses in temporal domain and Gaussian pulses in spatial domain was studied under the condition of constant voltage amplitude discrimination. For different discrimination level, the range error induced by the variation of amplitude and width of echo signal exhibited reverse variant tendency. As a result, the concept of optimum signal threshold ratio was proposed to improve the ranging accuracy of the lidar and its computational formula was also presented in this paper. Furthermore, the existence of the optimum signal threshold ratio was verified through experiments under different signal threshold ratio and the experiments showed that the optimum signal threshold ratio of our lidar was about 1.8. The study results provide the basis for the reasonable selection of the lidar to identify the level under different application conditions.

Key words laser technique; lidar; optimum signal threshold ratio; ranging accuracy

引 言

脉冲激光雷达是现代激光技术与传统雷达技术相结合的产物, 像传统的微波雷达一样, 由雷达向目标发射波束, 然后接收目标反射回来的信号, 并将其与发射信号对比, 获得目标的距离速度以及姿态等参数。与微波雷达比较, 脉冲激光雷达具有波束窄、角度和距离分辨率高、抗干扰能力强等特点^[1]; 与相位激光雷达比较, 则有作用距离远、无需合作目标等独特优势^[2], 因而脉冲激光雷达在气象检测、动态目标跟踪、地形地貌测绘等领域得到越来越广泛的应用。但与相位激光雷达测距精度可达厘米量级相比较, 脉冲激光雷达的测距精度一般在米的量级, 因此, 如何有效提高脉冲激

光雷达的测距精度, 是激光雷达技术领域中需要做出持续努力的关键环节^[3~5]。根据常规脉冲激光雷达的实际工作状态, 以钟型脉冲模型来表征发射激光的时域特性, 以高斯光束来描述其空域的光场分布, 阐明了由于激光发射的不稳定以及被测目标几何与反射特性的差异导致回波信号不稳定, 具体表现为幅值的抖动和回波脉冲展宽, 进而讨论了在恒电压幅度鉴别模式下, 回波信号幅度变化和宽度变化对测距精度的影响, 证明在一定范围内, 由回波幅度变化所造成的测距误差与由回波脉宽变化引起的测距误差, 随鉴别电平的取值不同, 呈现出相反的变化趋势, 因此, 为了尽可能把总的时延误差控制在较低的水平, 从而达到提高测距精度的目的, 需要综合考虑鉴别电平的选取对回波幅度变化和脉宽变化所带来的两种误差的影响。在此基础上, 提出了激光雷达最佳信号门限比(回波脉冲所形成的电压幅值与鉴别电平的比值)的概念, 并导出了相应的计算公式。通过对不同信号门限比条件下

作者简介: 王春勇(1967-), 男, 工程师, 博士, 主要从事激光雷达与光电检测技术研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhenhua@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2006-04-05; 收到修改稿日期: 2006-08-30

大量测距实验结果的分析,验证了最佳信号门限比的存在。在作者的实验条件下,最佳信号门限比的取值在 1.8 附近,实验结果与理论计算吻合良好,从而验证了最佳信号门限比的存在和计算公式的正确。这一研究结果为不同应用条件下,激光雷达鉴别电平的合理选取提供了依据。显然,上述理论计算公式也可用来实现激光雷达鉴别电平的自动控制,从而保证激光雷达在使用过程中始终处于最佳工作点,即测距误差最小的状态。

1 脉冲激光雷达测距原理及误差分析

激光测距的基本原理是利用激光在空气中传播的速度为已知这一特性,通过测定激光在被测距离上往返的时间来求得距离值。置于 A 点的光源,发射出光波,被 B 点的目标反射回 A 点接收。若光波在 AB 上往返传播的时间为 t_{Σ} ,传播速度为 c ,则距离 L 为:

$$L = (c \cdot t_{\Sigma}) / 2 \quad (1)$$

只要能求出光波往返的时间 t_{Σ} ,就可按 (1) 式求出距离 L 。

为了精确测量两点之间的距离,就要准确测量光脉冲在此段距离中的飞行时间。其工作过程为:激光雷达先向目标发射一个激光脉冲,同时向门控电路输入一个由发射光脉冲采样得到的光电脉冲开启门控开关,由时钟晶振向计算机传输填充脉冲,开始计时;当由目标反射的回波脉冲经接收物镜入射到光电探测器如雪崩二极管上时,产生的电脉冲经整形放大后关闭门控,停止计时,则计数器所记填充脉冲数乘以晶振周期则得到飞行时间。显然,飞行时间测量的准确度取决于时钟晶振的频率和门控电路开、关门时间的准确度^[6]。其中,晶振频率和开门时间的精度控制都可以通过预先设计满足测量要求,但关门时间的准确度与激光脉冲形状、目标几何和反射特性以及背景噪声等客观因素有关,因此,提高激光雷达测距精度的关键是提高关门时间的准确度。下面先简要讨论激光发射脉冲的时域特征为钟型脉冲,在恒电压幅度鉴别模式下,由回波信号波动造成的测量误差。

图 1 是在空间分布是钟型脉冲的激光器光发射模

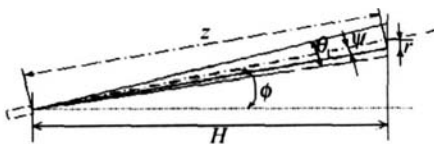


Fig 1 Laser transmitting model

型。图中, ϕ 是半径为 r 的点到束腰中心连线与中心轴夹角; θ_0 是激光束远场发散角; H 是激光发射点到目标的垂直距离; $z = H / \cos(\phi + \theta_0)$ 是目标点到激光雷达距离; ϕ 是发射激光方向与目标表面法线的夹角。则

其在远场发射功率可表示为^[7]:

$$P_r(\phi, t) = P_0 \exp[-4 \ln 2 (t - \tau/2)^2 / \tau^2] \times \exp\left[-\frac{2 \tan^2 \phi}{\theta_0^2}\right] \quad (2)$$

式中, P_0 是激光器输出峰值功率; τ 是半功率脉冲宽度。

为了简化模型,只考虑一维目标的情况。激光雷达探测器探测到的回波信号功率,是发射激光脉冲经目标上所有在接收光学系统视场内的点反射后,在同一时刻到达探测器上的功率的累加:

$$P_r(t) = \int_{\phi_1}^{\phi_2} P_r(\phi, t) d\phi \quad (3)$$

$$P_r(\phi, t) = \eta P_0 \exp\left[-4 \ln 2 \left(t - \frac{2z}{c} - \frac{\tau}{2}\right)^2 / \tau^2\right] \times \exp\left[-\frac{2 \tan^2 \phi}{\theta_0^2}\right] \cdot \frac{1}{z} \quad (4)$$

式中, η 为激光从发射到接收整个路径上的总的往返损耗率;将 (4) 式代入 (3) 式可得:

$$P_r(t) = \eta P_0 \int_{\phi_1}^{\phi_2} \exp\left[-\frac{4 \ln 2}{\tau^2} \cdot \left(t - \frac{2z}{c} - \frac{\tau}{2}\right)^2 - \frac{2 \tan^2 \phi}{\theta_0^2}\right] \cdot \frac{1}{z} d\phi \quad (5)$$

积分上下限分别为: $\phi_1 = -\theta_0/2$, $\phi_2 = \theta_0/2$ 。

由 (5) 式可以知道,激光回波脉冲的幅度和脉冲宽度,依赖于发射激光方向与被测目标表面法线间的夹角 ϕ ,光束远场发散角 θ_0 ,激光雷达到目标表面的垂直距离 H 和脉冲宽度 τ 等参量。在实用的激光测距仪或激光雷达系统中,关门信号的产生大多采用恒电压幅度鉴别模式,而在这种模式下,关门信号的准确度与激光回波脉冲的幅度和脉冲宽度密切相关,无论是回波信号幅度还是脉冲宽度的变化,都会造成关门时间的波动,从而引起测距误差。以下将对对此做进一步的说明并给出相应的误差计算公式。

所谓恒电压幅度鉴别模式,又称为恒压估计方法,是将回波信号与一个恒定鉴别电平作比较,当信号超过鉴别电平时就给出一个逻辑电平的截止脉冲^[8],如图 2 所示。然后由计数器记录脉冲个数,进而获得脉冲飞行时间并由此换算出目标距离。

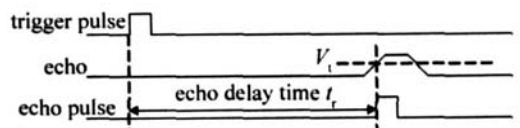


Fig 2 Sketch map of constant voltage evaluation

根据前面的讨论,在实测过程中,激光回波信号的幅度、脉冲波形会随测试条件而改变,因此回波前沿具有较大的随意性^[5,7],恒压估计的结果也会随之变化,就会出现所谓的“距离行走”现象^[9]。

综合而言,恒压估计方法的误差来源主要归结于噪声的干扰、信号幅度的变化和回波脉冲宽度的变化。从(5)式可知,回波信号为一钟型脉冲,其波形的一般形式可表示为:

$$V_r(t) = V_{r0} \exp\{-4 \ln 2 [t/\tau_r]^2\} + V_n \quad (6)$$

式中, V_r 代表回波信号的瞬时电压值, V_n 表示瞬时噪声电压, V_{r0} 是回波信号峰值电压(信号幅度), τ_r 是经过处理后的回波信号脉冲宽度,而这里的时间 t 是以回波信号的峰值点为坐标原点的。当与鉴别电平 V_i 作比较时,得到因信号幅度变化和因脉宽变化引起的恒压估计误差 Δt_{rV} 和 $\Delta t_{r\tau}$ 分别为^[10]:

$$\Delta t_{rV} = \frac{\tau_r}{4 \sqrt{\ln 2 \ln(V_{r0}/V_i)}} \cdot \frac{\Delta V_{r0}}{V_{r0}} \quad (7)$$

$$\Delta t_{r\tau} = \sqrt{\frac{\ln(V_{r0}/V_i)}{4 \ln 2}} \Delta \tau_r \quad (8)$$

对应的测距误差为:

$$\Delta L_{rV} = \frac{\tau_r}{4 \sqrt{\ln 2 \ln(V_{r0}/V_i)}} \cdot \frac{\Delta V_{r0}}{V_{r0}} \cdot \frac{c}{2} \quad (9)$$

$$\Delta L_{r\tau} = \sqrt{\frac{\ln(V_{r0}/V_i)}{4 \ln 2}} \Delta \tau_r \cdot \frac{c}{2} \quad (10)$$

(7)式、(8)式可以用来解释两种误差的成因:(1)信号幅度或脉冲宽度的固定偏移会导致测量值和真实值之间存在一个偏差 ΔL_s ,这就类似于一种系统偏差;(2)信号幅度或脉冲宽度在固定值附近的随机抖动,会产生偏差 ΔL_n ,这就类似于随机误差。

2 最佳门限比公式及其实验验证

由以上的讨论可知,当采用恒压鉴别法时,回波信号的幅度变化将影响关门信号的时间,从而导致较大的时幅误差;同样,当回波脉冲宽度发生变化时,也将产生关门信号的时间误差。这两种误差之和称为时间估计误差 Δt_t :

$$\Delta t_t = \Delta t_{rV} + \Delta t_{r\tau} = \frac{A}{\sqrt{\ln(V_{r0}/V_i)}} + B \sqrt{\ln(V_{r0}/V_i)} \quad (11)$$

式中, $A = \frac{\tau_r}{4 \sqrt{\ln 2}} \cdot \frac{\Delta V_{r0}}{V_{r0}}$, $B = \frac{1}{\sqrt{4 \ln 2}} \Delta \tau_r$ 。

由(7)式、(8)式和(11)式可知,时间估计误差 Δt_t 的两个分量 Δt_{rV} 和 $\Delta t_{r\tau}$ 与回波信号幅值 V_{r0} 和鉴别电平 V_i 之间的关系:当鉴别电平 V_i 不变的条件下,随回波信号幅值的增加, Δt_{rV} 减小, $\Delta t_{r\tau}$ 增大;当回波信号幅值 V_{r0} 不变的情况下,随鉴别电平 V_i 的提高, Δt_{rV} 增大,而 $\Delta t_{r\tau}$ 减小。由上述讨论可见,鉴别电平 V_i 和回波信号的幅值 V_{r0} 的变化引起时间估计误差的两个分量 Δt_{rV} 和 $\Delta t_{r\tau}$ 的变化趋势相反,因此,通过适当地选取鉴别电平 V_i ,可使时间估计误差 Δt_t 达到最小。

下面以(11)式为基础,在理论上验证最佳门限电平 V_i 的存在性及其大小。将 Δt_t 对 V_i 求一阶导数,得:

$$\Delta t_t' = -\frac{1}{2} A [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-3/2} \cdot \left[-\frac{1}{V_i} \right] + \frac{1}{2} B [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-1/2} \cdot \left[-\frac{1}{V_i} \right] \quad (12)$$

由极值定理可知:当 $\Delta t_t' = 0$ 时,时间估计误差 Δt_t 取得极值,此时, $V_i = V_{r0} e^{-\frac{A}{B}}$ 。将 Δt_t 对 V_i 求二阶导数,得:

$$\Delta t_t'' = \frac{3}{4} A [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-5/2} \cdot \frac{1}{V_i^2} - \frac{1}{2} A [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-3/2} \cdot \frac{1}{V_i^2} - \frac{1}{4} B [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-3/2} \times \frac{1}{V_i^2} + \frac{1}{2} B [\ln(V_{r0}/V_i)]^{-1/2} \cdot \frac{1}{V_i^2} \quad (13)$$

将 $V_i = V_{r0} e^{-\frac{A}{B}}$ 代入(13)式,可知: $\Delta t_t'' = \frac{B^{5/2}}{2V_{r0}^{3/2}} > 0$ 。

由上述计算可知:当鉴别电平 $V_i = V_{r0} e^{-\frac{A}{B}}$ 时,时间估算误差 Δt_t 取极小值,测距误差最小。 $V_i = V_{r0} e^{-\frac{A}{B}}$ 即为最佳鉴别电平。

为了更好地表达鉴别电平,引入“信号门限比”的概念。它定义为“回波信号的幅值 V_{r0} 与鉴别电平 V_i 的比值”。当测距系统的信号门限比取 $V_{r0}/V_i = e^{\frac{A}{B}}$ 时,测距仪具有最小的测距误差,因此,称之为“最佳信号门限比”。

由上述讨论可知,信号门限比直接影响激光测距仪的测距误差。当测距系统的信号门限比取为 $V_{r0}/V_i = e^{\frac{A}{B}}$ 时,激光测距仪具有最小的测距误差。下面从实验的角度,验证和确定最佳信号门限比。

应用自制的 XLD-II 型激光雷达,通过遮挡接收天线改变回波信号的大小,以获得不同回波信号幅值的实验条件。在实验中,回波信号幅值分别为 1.35V, 1.1V, 0.85V 和 0.58V,分别对应的信噪比为 6.75, 4.6, 4.00 和 2.96。在这 4 种情况下,设置不同的鉴别电平分析激光雷达系统的测距误差,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,激光测距仪的测距误差随信号门限比 (V_{r0}/V_i) 的变化存在唯一的极小值,这个极小值正好对应“最佳信号门限比”。在该信号门限比下,激光雷达系统具有最小的测距误差。从图中曲线可以看出,实验中所用激光雷达达到测距误差极小值所对应的最佳信号门限比约为 1.8。

综上所述可知:激光测距仪和激光雷达系统存在一个最佳信号门限比 $V_{r0}/V_i = e^{\frac{A}{B}}$,此时测距系统具有最小的测距误差。在实际应用中,可以通过对待测目标进行预测距,即多次测量待测目标的回波信号,然后

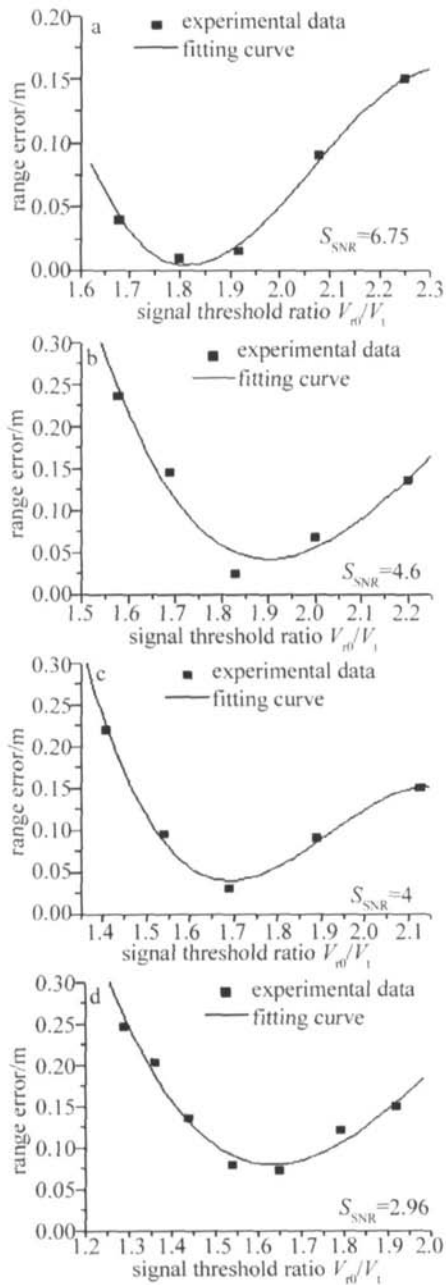


Fig 3 Relation of signal threshold ratio and range error

提取回波信号的幅值、脉宽等物理量,从而确定并设置测距系统的最佳信号门限比,然后对待测目标进行距离测量,这样,激光雷达系统具有最小的测距误差。

(上接第 402 页)

- [3] HUANG J, YUAN X D, WANG Ch Ch *et al* Measurement of laser argle drift by means of measure microscope [J]. Laser Technology 2005 29(3): 328~331 (in Chinese).
- [4] WANG Ch Y, LIU X F, YUAN Y H *et al* The diagnosis on spot and drift of CW-COIL laser beam [J]. High Power Laser and Particle Beams 1997, 9(1): 23~28 (in Chinese).
- [5] YU D L, SANG F T, JIN Y Q *et al* Study of the drift and deformation for COIL output beam spot [J]. High Power Laser and Particle Beams 2001, 13(2): 151~154 (in Chinese).

3 结论

讨论了恒电压幅度鉴别模式下,回波信号幅度和宽度变化对激光测距仪测距精度的影响。结果表明,激光测距仪和激光雷达系统存在一个最佳信号门限比 $V_{th}/V_1 = e^{\frac{A}{S}}$, 此时测距系统具有最小的测距误差。在此基础上,通过实验验证了最佳信号门限比的存在,并确定了 XLD-II 型激光雷达的最佳信号门限比约为 1.8, 该研究为不同应用条件下,激光雷达鉴别电平合理选取提供了理论依据,对提高提高激光测距仪和激光雷达系统的测距精度具有重要参考价值。

参考文献

- [1] GUO G J, LI Sh K, HU Y H. Study on the ranging performance of the airborne lidar [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(6): 595 (in Chinese).
- [2] SUN B, WANG X B, LI N Y *et al* Range-finding capability of laser range finder by extinction-ratio measurement without target [J]. Laser Technology 2004, 28(1): 82~84 (in Chinese).
- [3] MRSTK V, van BLARICUM G, CARDILLO B *et al* Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1996, 34(2): 219~228.
- [4] ZHANG L, QIN Sh Q, WANG Sh Sh *et al* Mini LD laser rangefinder used in intelligent vehicles [J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 130~131 (in Chinese).
- [5] DAI B M, ZHANG Ch, LI D Sh. Analysis of ranging error of pulse laser ranger [J]. Laser Technology, 1999, 23(1): 50~52 (in Chinese).
- [6] ZHANG Y, HUANG P Ch. High precision time interval measurement techniques and methods [J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 1~15 (in Chinese).
- [7] HU Y H, WEI Q N, LIU J G *et al* An analysis of the characteristics of the return pulse in airborne laser beam scanning [J]. Applied Laser 1997, 17(3): 109~111 (in Chinese).
- [8] PNG Q W, HE P K. Detecting probability and false alarm rate study of digital signal processor of laser ranger [J]. Laser Technology 2004, 28(5): 527~530 (in Chinese).
- [9] BUFTON J L. Laser altimetry measurements from aircraft and spacecraft [J]. Proc IEEE, 1989, 77(3): 463~477.
- [10] HU Y H, XUE Y Q. A study on the precision of airborne scanning laser ranging [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics 1999, 16(3): 193~197 (in Chinese).
- [6] LIU Y, JIN Y Q, SANG F T *et al* Measure and research of mirror displacement for COIL resonator [J]. High Power Laser and Particle Beams 2003, 15(3): 221~224 (in Chinese).
- [7] LIU F N, LIU D Zh, XU R F *et al* Performance of image processing in beams automatic alignment system [J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 335~337 (in Chinese).
- [8] CHEN Zh, CHANG Sh L, HU Y M *et al* An imaging processing method for measuring the array position of diffraction spot of high-power laser beam [J]. Optoelectronic Engineering 1998, 25(1): 6~12 (in Chinese).