

大量程脉冲激光测距仪性能检测方法

柳 鸣¹, 张国玉¹, 安志勇¹, 王劲松¹, 段 洁¹, 赵 昭², 郑志峰³

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 北方光电股份有限公司, 陕西 西安 710065; 3. 广东工商职业学院, 广东 肇庆 526020)

摘 要: 依据大量程红外脉冲式激光测距仪测距性能的检测需求, 提出了一种基于 MODTRAN 数据库的激光回波信号模拟的检测方法。在室内环境下模拟激光测距大气回波信号, 以实现对测距仪的测距精度及最大测程两项指标的检测。该方法调用 MODTRAN 数据库计算出 GJB2241A 中仲裁实验的大气辐射透过率, 在此基础上建立回波功率的数学模型, 并采用 FPGA 以及模拟延时器件实现预设延时, 使得距离模拟与能量模拟自成回路, 实现了测距回波的真实模拟。实验结果表明: 设计的回波信号模拟系统可实现 50 m~22 km 的大量程距离模拟, 回波延时精度优于 2 ns, 最大测程的测准率可达 90%, 满足了激光测距仪性能测试的检测需求。

关键词: 激光测距仪; 测距精度; 最大测程; MODTRAN 数据库; 大气回波模拟

中图分类号: TH39; TH745 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2679-05

Detection method for ranging performance of pulsed laser range finder with wide measuring range

Liu Ming¹, Zhang Guoyu¹, An Zhiyong¹, Wang Jinsong¹, Duan Jie¹, Zhao Zhao², Zheng Zhifeng³

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. North Electro-Optic Co., LTD, Xi'an 710065, China;

3. Guangdong College of Business and Technology, Zhaoqing 526020, China)

Abstract: According to the measuring requirement for the performance measurement of pulse laser range finder with wide range, a new measuring method of laser echo signal simulation based on MODTRAN database was proposed. The laser atmospheric echo signal was simulated by detection system indoor to realize detecting of the two indexes which were the ranging precision detection and maximum range detection of laser range finder better than similar equipments. The MODTRAN meteorological parameter database method was adopted to calculate atmospheric radiation transmittance of arbitration experimental in GJB2241A and mathematical model was established on this basis, FPGA and analog delay device were adopted to achieve presupposition time delay, this method made distance simulation and energy simulation becoming a close loop realizing realistic simulation of ranging laser echo signal. Experiments results show that designed laser echo signal simulator system can realize 50 m~22 km wide range distance simulation,

收稿日期: 2015-01-05; 修订日期: 2015-02-09

基金项目: 高功率半导体激光国家重点实验室科研基金(91400310450)

作者简介: 柳鸣(1988-), 男, 博士生, 主要从事精密仪器与检测技术的研究。Email: liuming2525775@126.com

导师简介: 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事航天地面测试技术、光电仪器与检测技术方面的研究。

Email: zh_guoyu@163.com

echo delay precision is better than 2 ns, measurement accuracy of maximum range is 90% meeting the detecting demand of the ranging performance of laser range finder.

Key words: laser range finder; ranging precision; maximum range distance; MODTRAN database; aerosol echo simulation

0 引言

脉冲激光测距仪因具有探测距离远、测距精度高等特点,在军事、航空航天等领域获得了广泛应用。脉冲激光测距仪的测距精度与最大测程是实现其基本功能的根本保障,需对这两项重要指标进行检测^[1-4]。

目前,国内常见的检测手段有基于光纤延时检测法、数字可编程门阵列延时检测法、斜坡电路比较检测法等,这些方法存在模拟距离受限、延时精度不高等缺点,无法对最大测程指标进行检测^[5-6]。文中研究的大量程脉冲测距仪性能检测系统采用 MODTRAN 大气传输特性数据库模拟军标 GJB2241A-2008 中的仲裁试验气象参数,采用高精延时模块和激光辐射模块实现 1 064 nm、1 540 nm 和 1 570 nm 等多个波长的测距仪回波模拟。实现了一台设备对两项指标的检测,满足 50 m~22 km 宽测程、0.2 m 高精度的测距精度指标的检测需求,并同时定量地对最大测程指标进行检测,优于以往的测试方法,对红外脉冲激光测距仪的制备与检测具有实际意义。

1 系统组成及工作原理

脉冲激光测距仪性能检测系统的基本原理是用一个可控延迟的脉冲激光信号代替测距仪发射的反射回波模拟出等效距离^[7-8]。

其工作过程是:模拟距离参数通过串口送给置数缓冲器锁存,同时依据 GJB2241A 测试环境的气象参数,运用 Modtran 数据库的功率模型计算出回波信号峰值功率,并通过辐射模块控制输出功率。当测距仪发射激光信号后,脉冲激光通过衰减片和聚焦透镜组件汇聚于高速 PIN 探测器上,将光脉冲信号转换成电脉冲信号,经由放大整形电路及阈值门限电路后,单稳态触发器将接收到的脉冲信号展宽,用该信号作为高频振荡器的门控信号。FPGA 数字延时模块是一个减法计数器,当门控信号有效时做减法运算,当延时计数器递减溢出时触发模拟延时模块,数字延时模块与模拟延时模块之间由皮秒级比较器连接。模拟延时模块信号溢出后触发辐射模块发出一束激光送给激光测距仪,即完成一次测距仪性能检测试验。系统组成如图 1 所示。

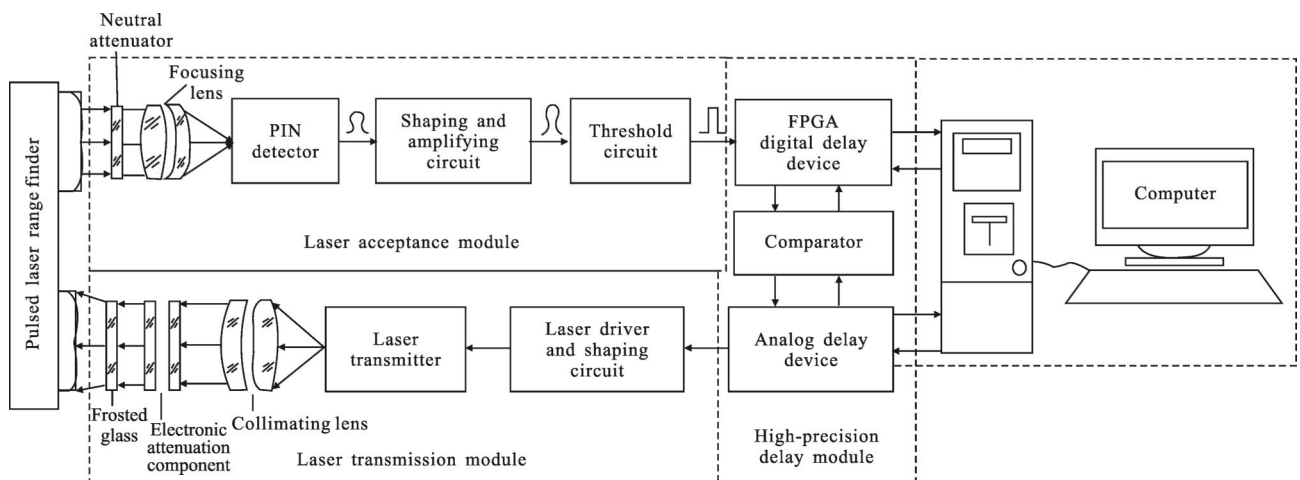


图 1 检测系统组成与原理框图

Fig.1 System composition and principle diagram of detection system

2 模型建立及方法实现

2.1 基于 Modtran 大气透过率的回波功率模型

在计算回波信号功率的具体应用中, Modtran 数据库仅提供红外激光大气传输透过率, 并不能直接得出红外激光回波信号峰值功率。因此需要根据测距仪的光学特性建立回波信号功率与大气透过率之间的关系, 即经过大气路径衰减后的回波功率数学模型。脉冲激光测距仪标定试验中, 测距仪的激光传输过程如图 2 所示。

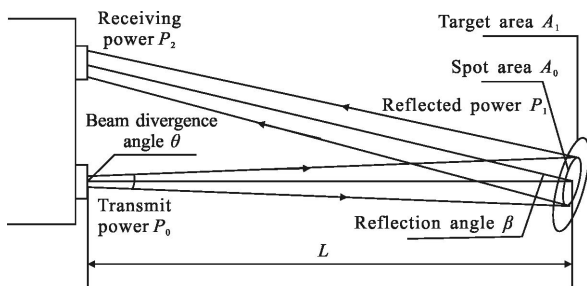


图 2 脉冲激光测距仪光路传输图

Fig.2 Optical path of pulsed laser range finder

设测距仪的辐射功率为 P_0 , 发射角为 θ , 发射光学系统组件透过率为 τ , 测距仪与待测目标距离为 L , 则发射辐射强度 I_0 , 即单位立体角 Ω 内的辐射功率为:

$$I_0 = \frac{\tau P_0}{\Omega} = \frac{\tau P_0 \pi \times [\tan(\theta/2) \times L]^2}{L^2} = \frac{\tau P_0}{\pi \tan^2(\theta/2)} \quad (1)$$

因发射激光的发散角非常小, 故 $\tan \theta \approx \theta$ 。且在发散角 θ 内的辐射强度是均匀的。经过大气传输衰减后, 照射在目标处的光束截面积为 A , 目标接收表面光斑面积为 A_0 。

$$A = \cos \beta \cdot A_0 \quad (2)$$

式中: β 为目标反射表面法线与光轴之间的夹角。

目标表面反射的光功率可表示为:

$$P_1 = I_0 \cdot T \cdot \frac{\cos \beta \cdot A_0}{L^2} \quad (3)$$

式中: T 为大气衰减函数。

不同目标对红外辐射的反射系数 ρ 不同, 若将目标看作一个均匀漫反射, 则反射光在 2π 立体角内向各个方向的辐射强度相等, 其反射辐射强度 I_1 为:

$$I_1 = \frac{\rho P_1}{2\pi} \quad (4)$$

那么, 测距仪接收辐射功率 P_2 为:

$$P_2 = I_1 \cdot T \cdot \frac{A_1}{L^2} \quad (5)$$

式中: A_1 为接收机光学系统孔径面积; T 为大气路径对激光的衰减函数。其具体表达式如下式所示:

$$T = \exp[-2 \int_0^L \mu(r, \lambda) dr] \quad (6)$$

式中: $\mu(r, \lambda)$ 是关于激光波长 λ 在距离 r 处的衰减系数, 其值与透过率之和为 1, 而透过率可由 MODTRAN 计算而得。

综上所述, 接收功率表达式为:

$$P_2 = \frac{2\tau\rho P_0 \cdot \cos\beta A_0 A_1}{\theta^2 \pi^2 L^2} \cdot \exp[-2 \int_0^L \mu(r, \lambda) dr] \quad (7)$$

2.2 激光回波功率衰减实现

辐射模块采用半波片和偏振片组合的方式对激光光强进行衰减, 从而达到输出功率连续精度的控制。其衰减组件如图 3 所示。

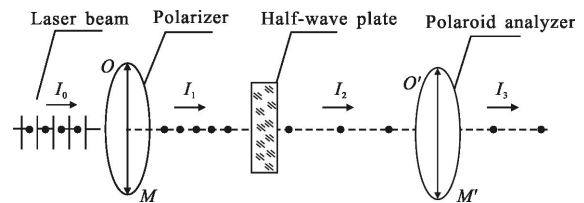


图 3 衰减组件示意图

Fig.3 Schematic diagram of attenuation component

激光通过起偏器后的线偏振光 I_1 用 Jones 矢量 E_1 来表示:

$$E_1 = A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

线偏振光 I_1 振动方向和半波片光轴成 θ 角, 半波片的 Jones 矩阵 J_1 可表示为:

$$J_1 = A \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi) \end{bmatrix} \quad (9)$$

于是从半波片出射光束 I_2 的 Jones 矩阵可表示为:

$$U_2 = A \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \exp(i\pi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

检偏器和半波片的光轴同样也成 θ 角, 故进入检偏器的光束 I_2 用 E_2 表示:

$$E_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} U_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp(i\pi) \\ -\sin \theta \cos \theta + \cos \theta \sin \theta \exp(i\pi) \end{bmatrix} \quad (11)$$

检偏器的 Jones 矩阵:

$$J_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

透过检偏器的光束 I_3 可由 E_3 表示:

$$E_3 = J_2 \times E_2 = A \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta \exp(i\pi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其光强 I_3 可通过 Jones 矢量 E_3 的复共轭转置与其左乘得到:

$$I_3 = A^2 \left[1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (14)$$

故透过率可表示为:

$$T = \frac{I_3}{I_0} = A^2 \left[1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] / A^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \quad (15)$$

衰减组件的透过率 T 在 0~1 之间连续变化如图 4 曲线所示, 实现回波功率的复现。

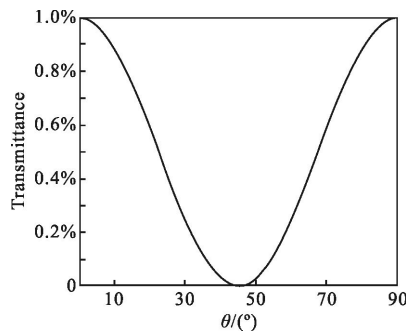


图 4 衰减组件透过率随 θ 角的变化率

Fig.4 Variance rate of transmittance of attenuation component versus rotated angle θ

3 精度分析

3.1 延时精度分析及修正

延时模块的误差主要由随机误差和系统误差组成。系统误差可以通过标定与校正消除, 通过实验标定可得系统误差 $t_0=125$ ns, 延时随机误差为:

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^i x_i^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{70^2 + 120^2 + 140^2} = 113.87 \text{ ps} \quad (16)$$

式中包含固定阈值鉴别误差 70 ps, LVECL 阈值鉴别芯片抖动误差 120 ps。比较器的抖动误差 140 ps, k 为置信因子, 根据常见误差分布规律, 置信因子取 $\sqrt{3}$ 。晶振频率与标称频率的标称误差

$$k = \frac{|f_s - f_0|}{f_0} = 10^{-5} \quad (17)$$

式中: f_0 为晶振中心振动频率 100 MHz。在该晶振频

率下经过四倍频后, FPGA 每个工作周期的误差为 0.05 ps, 设延时时间为 t , 则累积误差

$$at = \frac{t}{2.5 \text{ ns}} \cdot 0.05 \text{ ps} = 2 \times 10^{-5} t \quad (18)$$

综上所述, 延时误差函数为:

$$\eta(t) = 2 \times 10^{-5} t + 125 \text{ ns} \pm 113.87 \text{ ps} \quad (19)$$

3.2 回波功率复现精度分析

辐射模拟器的功率变化主要是靠调节半波片和偏振片之间的夹角来实现的, 由步进电机带动蜗轮蜗杆运动, 从而实现预定辐射功率的模拟。步进电机的最小步进角是 1.5° , 机械传动比为 1:30, 则一个脉冲当量转动的角度

$$\Delta\theta = \frac{1.5^\circ}{30} = 0.25^\circ \quad (20)$$

由公式(15)可知, 辐射模拟功率是关于角度的一个函数, 对其求偏微分可得:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = -4 \sin(2\theta) \cos(2\theta) = -2 \sin(4\theta) \quad (21)$$

将 $\Delta\theta$ 代入上式, 可计算出一个脉冲当量所引起的模拟功率相对误差

$$\eta = \frac{|\Delta T|}{T} = \frac{|-2 \sin(4\Delta\theta) \cdot \Delta\theta|}{1 - \sin^2(2\theta)} = 4.85\% \quad (22)$$

4 实验及结果分析

实验通过标定某型号的激光测距仪完成, 其主要技术指标如下: 作用距离 5 km, 激光波长 $1.064 \mu\text{m}$, 输出峰值功率为 2 MW, 束散角 θ 小于 1 mrad, 脉冲宽度 10 ns, 测距精度 0.1 m。对该型号激光测距仪进行检测, 其实验装置系统如图 5 所示。

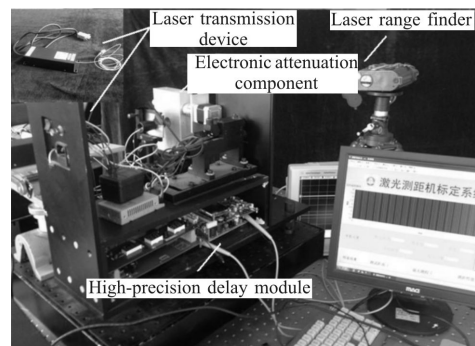


图 5 检测系统样机

Fig.5 Detection system prototype

采用 1 GHz 采样频率的数字示波器对检测系统模拟不同距离的回波信号的延时精度进行检测, 示

波器测得延时数据如表1所示。由表1可知,检测系统的延时精度优于2 ns,与设计分析吻合。

表1 延时精度验证实验数据表

Tab.1 Verification test data table of delay precision detection

Order number	Presupposition distance simulation/m			
	1 000	3 000	5 000	7 000
	Time delay values measured by digital oscilloscope /ns			
1	6 665.85	19 999.12	33 334.64	46 668.35
2	6 665.76	20 001.24	33 335.08	46 664.97
3	6 665.21	20 001.57	33 334.93	46 666.67
4	6 666.03	20 001.78	33 333.56	46 668.25
5	6 667.56	19 999.92	33 332.15	46 665.53
6	6 664.96	20 001.43	33 334.03	46 666.72
Mean value	6 665.916	20 000.975	33 333.964	46 667.032
σ	0.805 6	0.937 33	1.139 6	1.322 2
Limit error	1.72	1.77	1.76	1.85

为了验证室内检测测距仪最大测程的可行性,利用野外立靶实验与其进行对比。以迷彩布为合作目标,从距目标4~7 km处每隔500 m作一次标记,在每个标记处有效发射激光50次,记录下所有测量数据并关注临界稳定状态,即测准率落入40%~60%区间范围内。将野外立靶实验与检测系统所测结果进行比对,实验数据表如表2所示,两者检测结果基本吻合。

表2 最大测程验证实验数据表

Tab.2 Verification test data table of maximum range distance detection

Target distance/m	Simulated power/W	Attenuation DB/dB	Accuracy in field	Accuracy indoor
4 000	5.6×10^{-5}	6.4	100%	100%
4 500	4.3×10^{-5}	9.0	95%	100%
5 000	3.2×10^{-5}	9.8	79%	86%
5 500	2.8×10^{-5}	11.6	56%	63%
6 000	2.5×10^{-5}	12.4	46%	52%
6 500	2.1×10^{-5}	15.6	32%	38%
7 000	1.7×10^{-5}	17.3	12%	19%

5 结 论

文中介绍了一种新的大量程脉冲式激光测距仪测距性能的检测方法,在高精延时技术的基础上将Modtran大气传输透过率数据库结合大气回波功率衰减的数学模型以及回波功率复现方法应用于激光测距仪最大测程的检测中。实验结果表明:该方法最大测程的测准率高于90%,延时误差小于2 ns,相较于光纤延时法的延时精度提高了5倍以上。但系统处理数据较大,计算时间较长,可在随后的研究中优化算法并考虑采用嵌入式系统代替工控机。该方法还适用于武器火控设备的解算精度检测以及机载雷达测距性能检测中。

参考文献:

- [1] Gao Yang, Lei Jie, Yu Hong, et al. Technology of Simulation for High-Precision Echo Laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 196-199. (in Chinese)
- [2] Wu Gang, Li Chunlai, Liu Yinnian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system[J]. *Infrared Millim Waves*, 2007, 26(3): 213-221. (in Chinese)
- [3] Yang Ran, Zhang Gaofei, Zhang Zichen, et al. Design and experiment of a laser ranging scheme for aerospace applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, (3): 700-706. (in Chinese)
- [4] Zeng Chang'e, Wang Qianqian, Chang Gang, et al. Novel method for maximum range measure of pulse laser range finder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 34(6): 664-668. (in Chinese)
- [5] Li H. Estimation method for maximum range of laser ranging system[C]//ICEEE, IEEE, 2010: 1-3.
- [6] Brown J, Hughes C, Brunner L. Real-time hardware design for improving laser detection and ranging accuracy [C]//ASILOMAR, IEEE, 2012: 1115-1119.
- [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)
- [8] Ming L, Guoyu Z, Zhiyong A, et al. Design of the calibrating system for laser ranging accuracy based on DS1023[C]//MEC, IEEE, 2013: 628-631.