

一种激光雷达复合式扫描方法及试验

马辰昊, 付跃刚, 宫平, 欧阳名钊, 张书瀚

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 传统激光雷达系统中, 固态激光光源的重复频率和扫描系统的扫描带宽、精度均制约着系统成像。为提高激光雷达的成像精度, 首先, 在激光光源上采用经 EDFA 放大后的 DFB 高重频激光光源。其次, 提出了一种 PZT 与振镜相结合的两级复合式激光扫描方法, 利用 PZT 对小视场范围进行精细扫描, 利用振镜对 PZT 的扫描视场和接收视场进行偏转完成粗扫描, 在提高激光雷达扫描精度的同时拥有较大的扫描视场。最后, 经试验所设计的复合式扫描激光雷达的方位角为 ± 99 mrad, 俯仰角为 ± 49.5 mrad, 角分辨率达到 0.1 mrad, 测距精度达到 0.159 m。

关键词: 激光雷达; 视场拼接; 振镜

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3270-06

A composite scanning method and experiment of laser radar

Ma Chenhao, Fu Yuegang, Gong Ping, Ouyang Mingzhao, Zhang Shuhan

(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In traditional laser radar system, the imaging is influenced by repetition rate of selected solid-state laser as well as scanning bandwidth and scanning precision in the laser scanning system. In order to improve the scanning bandwidth and precision, DFB high-repetition-rate semiconductor laser which was amplified by EDFA was adopted as the laser source firstly. Secondly, a two-stage composite laser scanning method had been proposed with combination of PZT and galvanometer. PZT got on meticulous scanning in small areas, then galvanometer was used to deflect and finish coarse scanning on the PZT scanning field and receiving the field. The scanning accuracy had been raised and the scanning field of laser radar had been expanded simultaneously. At last, azimuth of composite scanning laser radar is ± 99 mrad, pitch angle is ± 49.5 mrad. Angular resolution can measure up to 0.1 mrad, and the ranging precision can reach 0.159 m.

Key words: laser radar; field joint; galvanometer

收稿日期: 2015-03-21; 修订日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61108044)

作者简介: 马辰昊(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光电检测方面的研究。Email: mch6567@163.com

通讯作者: 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测方面的研究。Email: fuyg@cust.edu.cn

0 引言

传统激光雷达系统在成像过程中主要有两个参数制约着激光雷达的成像带宽,分别是固态激光器的重复频率和扫描系统的扫描带宽与扫描精度。为了提高激光雷达的成像带宽与精度,近年来国内外诸多学者为此提出了诸多解决方案。Tuley 等人^[1]提出采用对二维激光雷达增加一维扫描装置的方法实现三维测量, Surmann 等人^[2]采用机械式二维扫描装置实现三维激光测量, 瞿荣辉等人^[3]提出一种基于电光扫描的光学相控阵技术, 孟昭华等人^[4]使用窄线宽半导体激光器利用声光移频器、马赫-曾德尔幅度调制器构建了一套基于平衡相干探测与啁啾调幅的激光测距实验系统, 郑睿童等人^[5]提出一种基于线阵 APD 探测器的脉冲式一维非扫描激光雷达系统, 吴丽娟等人^[6]提出盖革模式 APD 阵列无扫描式激光雷达, 并对其三维成像进行了仿真。参考文献[1-2]所述虽然扫描方式简单, 扫描角度大, 但是扫描效率低, 激光光斑行与行之间的间距比较大, 光斑分布的均匀性受很大限制。参考文献[3-4]所用的声光扫描和电光扫描的方式, 扫描速度快、效率高, 属无惯性扫描, 但其扫描视场小且均匀性差, 参考文献[5-6]提出的无扫描方式虽然具有对激光脉冲频率要求低, 成像速度快的优点, 但扫描视场小, 分辨率低。鉴于此, 文中提出了一种基于 PZT 快速倾斜镜与伺服振镜相结合的两级复合式激光扫描方法, 并给出相应的原理性试验验证。

1 PZT 原理简述

压电陶瓷驱动器(PZT)具有体积小、响应速度快、重复定位精度高、位移分辨率高等优点。在一些需要进行超精密定位以及微小位移控制的应用中, 具有其他驱动器无法比拟的地位, 是比较理想的驱动器。PZT 快速倾斜镜物理控制结构如图 1 所示, 其中 X、Y 为 PZT 振镜的两个运动平面, A、B、C 分别为 PZT 快速倾斜镜的三个控制柱的高度, a 为 A 控制柱到 B、C 控制柱连线间的距离, b 为 B、C 控制柱之间的距离, d 为通过 A、B、C 三个控制柱中心的圆的直径。其中, a 、 b 、 d 由所选的 PZT 快速倾斜镜型号确定, PZT 快速倾斜镜的等效方位角 θ_x 、俯仰角 θ_y 和移

动距离 Z 分别可表示为:

$$\theta_x = [A - 1/2(B+C)]/a \quad (1)$$

$$\theta_y = (B-C)/b \quad (2)$$

$$Z = (A+B+C)/3 \quad (3)$$

A、B、C 三个压电陶瓷控制柱中任何一个控制柱两端电压值的变化都将引起 PZT 振镜平面倾角的变化, 该平面的变化可以转换为 X、Y 两个方向的运动, 从而可将光线偏移量对应为 A、B、C 三个控制柱两端电压模拟量变化, 进而控制光线的运动。

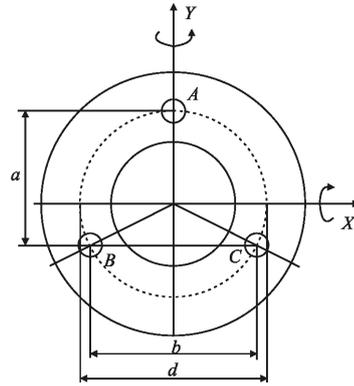


图 1 PZT 振镜物理控制结构

Fig.1 Control principle of PZT FSM

PZT 快速倾斜镜伺服系统的执行机构包括平面反射镜、PZT 平台以及 PZT 驱动器。通过对器件参数和实验测试采集数据拟合可以得到 PZT 快速倾斜镜运动的数学模型。如果认为 X 轴和 Y 轴是相互独立的, 不考虑两轴间的耦合影响, 则 X 轴和 Y 轴的运动可等效为二阶振荡环节^[7]。利用频响分析仪测出 PZT 快速倾斜镜表面的方位角和俯仰角的频率特性曲线, 经过曲线拟合得出开环传递函数:

$$G_f(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中: 谐振频率 $\omega_n = 2\pi f_n = 9240 \text{ rad/s}$; 阻尼因子 $\xi = 0.7$ 。

2 复合式扫描激光雷达设计实例

复合式扫描系统拥有粗精两级扫描装置, 粗扫描系统由振镜电机实现, 而精扫描系统由快速倾斜镜实现, 具体设计实例如下。

2.1 复合式扫描发射子系统

该系统光源采用 1550 nm 的 DFB 高重频半导体激光器作为种子光源, 这类激光器与 F-P 腔激光

器相比具有动态单纵模窄线宽、波长稳定性好两大优点,并且它的 EA 电吸收调制具有外形尺寸小、啁啾效应弱和驱动电压低等优点^[8]。两者可以被集成在一起形成电吸收型调制激光器。但是 DFB 激光器的输出功率无法满足激光雷达的功率需求,所以该系统采用两级 EDFA 放大的方式实现其高频率与高功率的信号输出,最大输出功率为 2 W。

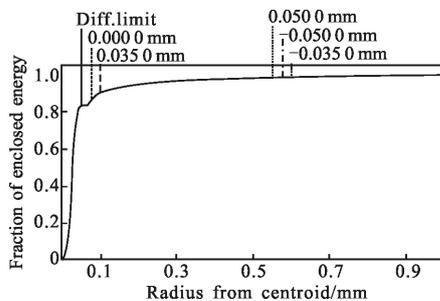
复合式扫描光学发射天线需要保持让准直后的激光束的光斑面积远远小于目标面积。由于采用 PZT 快速倾斜镜进行精扫描,为区分出相邻两个扫描光点,需要使激光束的发散角小于 PZT 快速倾斜镜单步偏转角度的 2 倍。所采用的光纤内径为 $62.5 \mu\text{m}$,准直系统光学结构如图 2 所示,出射光为发散角为 0.1 mrad 的准平行光,前透镜组由三片透镜组成,后透镜组由两片透镜组成,出瞳直径为 40 mm ,工作在 $0\sim 3000 \text{ m}$ 处最大光斑直径为 30.648 mm 。



图 2 ZEMAX 仿真的发射光学系统结构图

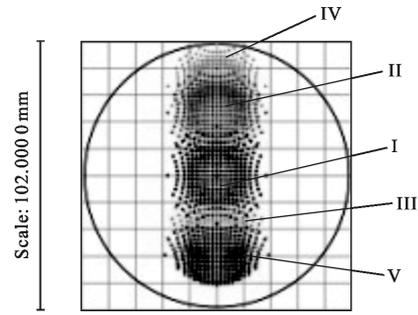
Fig.2 Transmitting optical system structure simulated by ZEMAX

该光学系统性能评价如图 3 所示,图 3(a)为衍射能量圈,80%以上的能量主要集中在光斑中心;图 3(b)为该光学系统 1 km 远处光斑足迹图,区域 I 为光源物面高度为 0 时的光斑足迹,区域 II 和区域 III 为光源 y 方向上物面高度为 $\pm 0.035 \text{ mm}$ 时的光斑足迹、区域 IV 和区域 V 为光源物面高度为 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 时的光斑足迹,能量主要集中在直径 100 mm 的光斑内,其性能符合复合式扫描光学发射天线的使用要求。



(a) 衍射能量图

(a) Diffraction encircled energy



(b) 足迹图

(b) Footprint diagram

图 3 发射光学系统性能评价

Fig.3 Performance evaluation of transmitting optical system

2.2 复合式扫描接收子系统

复合式扫描光学接收天线采用卡塞格林望远镜结构,探测器选用光敏面直径为 3.75 mm 的 APD 雪崩二极管,在设计过程中,光学系统的光阑和主镜重合,所以根据系统的技术指标可设系统的入瞳直径 $D=150 \text{ mm}$,由经验得 $\alpha=30\%$,为减小系统的体积,缩短筒长,因此主镜和次镜之间的距离 d 不能过大,选取主镜的相对孔径 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{2}$,则系统主镜的焦距 f'_1 为:

$$f'_1 = -1 \times D = -2 \times 150 = -300 \text{ mm} \quad (5)$$

次镜的放大率 β 为:

$$\beta = \frac{f'_1}{f'_2} = \frac{750}{-300} = -2.5 \quad (6)$$

确定了 α, β 后,主镜与次镜的顶点曲率半径 r_1, r_2 ,以及它们之间的距离 d 可由下式确定:

$$r_1 = 2 \times \frac{f'_1}{\beta} = 2 \times f'_1 = 2 \times (-300) = -600 \text{ mm} \quad (7)$$

$$r_2 = \frac{\alpha \beta r_1}{(\beta + 1)} = \frac{0.3 \times (-2.5) \times (-600)}{(-2.5 + 1)} = -300 \text{ mm} \quad (8)$$

$$d = \frac{f'_1(1-\alpha)}{\beta} = f'_1(1-\alpha) = -300 \times (1-0.3) = -210 \text{ mm} \quad (9)$$

RC 系统为特殊的两镜反射系统,即 RC 系统消除了球差 S_I 和彗差 S_{II} ($S_I = S_{II} = 0$),由此可分别计算出主镜与次镜的偏心率 e_1 和 e_2 ,如下式:

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^3} = 1 + \frac{2 \times 0.3}{(1-0.3) \times (-2.5)^2} = 1.137143 \quad (10)$$

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1+\beta)(1-\beta)}{(1+\beta)^3} =$$

$$\frac{\frac{2 \times (-2.5)}{1-0.3} + (1-2.5) \times (1+2.5)}{(1+(-2.5))^3} = 7.560847 \quad (11)$$

其光学设计效果如图 4 所示，优化后光学系统视场角为 5.009 mrad，符合复合式扫描光学接收天线的使用要求。

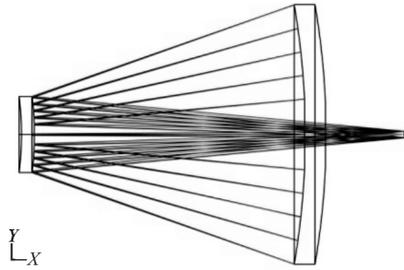


图 4 ZEMAX 仿真的接收光学系统结构图

Fig.4 Receiving optical system structure diagram simulated by ZEMAX

2.3 复合式扫描系统

复合式扫描系统工作示意图如图 5 所示，由光纤发出的光束经准直后入射到 PZT 快速倾斜镜的镜面上，PZT 扫描主要用来实现精扫描，由于 PZT 分辨率为 0.23 μrad，重复精度为 1.6 μrad，所以为了确保定位精度不受分辨率影响，该系统设定步进角度为 50 μrad，由反射原理可知激光光束将被偏转 0.1 mrad，即每个区域进行 33×33 个点的扫描，形成一个由 33×33 个点组成的水平方向和垂直方向均为 3.3 mrad 的正方形 PZT 扫描视场，接收系统的接收视场为 5.009 mrad，PZT 扫描视场小于接收视场，均可被接收天线所接收。通过对振镜的 X 驱动器和 Y 驱动器进行控制，使 X 反射镜和 Y 反射镜每次偏转 1.65 mrad，对应的 PZT 扫描视场与接收视场将被偏转 3.3 mrad，控制振镜逐行扫描形成一个 60×30 的振镜扫描区域，通过视场拼接形成一个由 1 980×990 个点组成的激光雷达扫描视场。

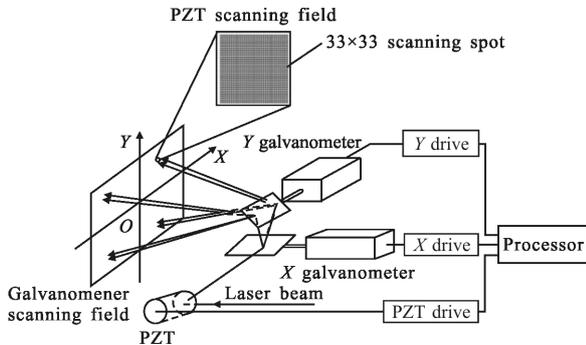


图 5 复合式扫描系统工作示意图

Fig.5 Working diagram of composite scanning system

PZT 的调整范围为 ±0.825 mrad，首先需要让 PZT 的基准零度与零度接收系统共轴，然后调整激光发射系统与 PZT 的基准零度共轴，实现三者共轴，PZT 被安装在卡塞格林系统次镜后面，进而使发射光轴与接收光轴两者平行输出，误差小于 10 s。

振镜扫描主要用来实现粗扫描，由 PZT 镜面反射的激光束通过振镜后被有规律的偏转。系统采用逐行扫描的方式，从上至下以“z”字型的方式进行逐行扫描。PZT 工作频率为 3 500 Hz，激光器与探测器的重频达到 40 MHz 即可，设定扫描振镜的扫描频率为 3.214 Hz，每帧扫描区域为 60×30，每帧可测量 1 800 个区域，其方位角 α 与俯仰角 β 分别为：

$$\alpha = 2Nn_x\theta = \pm 99 \text{ mrad} \quad (12)$$

$$\beta = 2Mn_y\theta = \pm 49.5 \text{ mrad} \quad (13)$$

式中：θ 为 PZT 快速倾斜镜的步进角度；n_x 为 X 方向的步数；n_y 为 Y 方向的步数；M 为振镜 X 方向的扫描区域数；N 为振镜 Y 方向的扫描区域数。

激光雷达工作原理框图如图 6 所示。DFB 激光发射模块接收到由 FPGA 发出的数字信号后发射出经过调制的高频激光光波，经过两级 EDFA 系统放大后由发射光学系统准直后入射到 PZT 的振镜面上，通过 FPGA 对 PZT 驱动模块的控制，使得激光束按要求偏转，再通过控制振镜模块改变方向后射向被测目标。反射光经振镜模块偏转后通过接收光学系统会聚由 APD 接收，滤除振镜的镜面漫反射光和滤光片的反射光带来的信号干扰，经过信号处理电路处理后得到距离信息。由 ARM 将这些距离信息与提供给 PZT 模块和振镜模块的信号相结合就可得到目标区各点的三维位置信息，最后将相关信息发送到上位机上，由上位机对采集到的数据进行处理得到三维激光雷达图像。

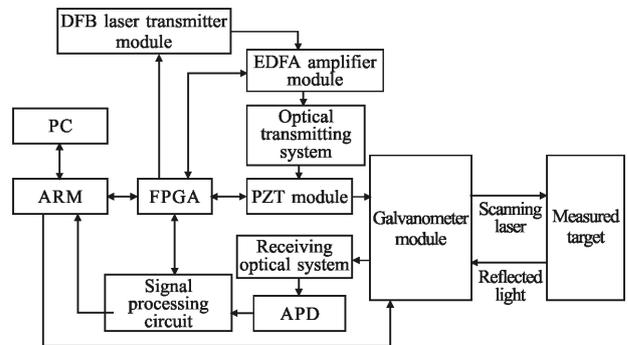


图 6 激光雷达工作原理框图

Fig.6 Working principle diagram of the laser radar

激光雷达测距系统采用激光脉冲法对目标进行测距,脉冲测距是通过测量主波脉冲和回波脉冲的时间差来计算出被测距离^[9]。测量时间的方法是在确定的时间起止点之间用时钟脉冲填充计数。通过控制触发器得到一个由主波脉冲和回波脉冲确定的脉宽为 t 的定时脉冲^[10]。对该定时脉冲插入频率为 $f=1/\Delta T$ 的时钟脉冲用来对定时脉冲的脉宽进行计数,若计数值为 N ,则脉宽持续时间为:

$$t=N\Delta T=\frac{N}{f} \quad (14)$$

得出目标距离:

$$S=\frac{ct}{2}=\frac{Nc}{2f}=KN \quad (15)$$

式中: $K=\frac{c}{2f}$,表示一个计数脉冲所对应的被测距离。

K 值的大小决定了测量的精度,即: $\Delta K=\frac{c}{2}\Delta T$ 。

利用 Cyclone V FPGA 的高速 IO 锁相环倍频和 SER/DES 功能得到 2.5 GHz 高频脉冲用来作为计数脉冲, $\Delta T\leq 0.2$ ns,测距分辨率 $\Delta K\leq 0.06$ m。

3 实验结果及分析

利用所研制完成的激光雷达系统样机进行了大量的系统实验,对其主要性能进行了测试。将激光雷达样机对准对面约为 55 m 远处的教学楼一角,进行定距离成像。图 7(a)为对面教学楼照片,图中黑框内为系统探测区域,图 7(b)为激光雷达所测得的被测区

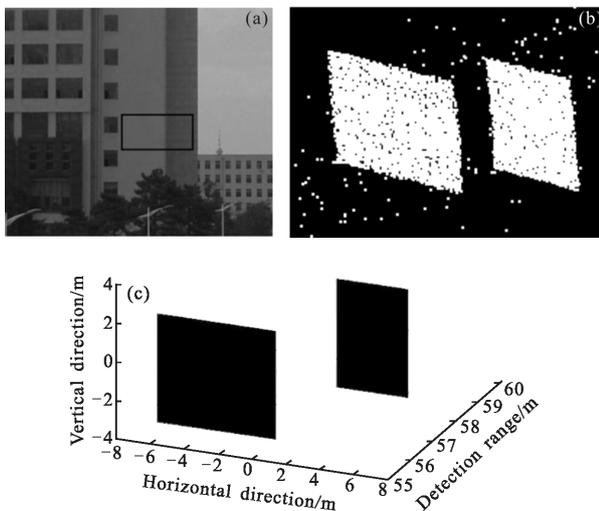


图7 激光雷达所测区域三维图像

Fig.7 Three-dimensional diagram of laser radar measurement area

域三维点云图像,图 7(c)为经过数据处理后目标区域的三维图像,可见前后两面墙间距离约为 2.7 m。

经现场利用高精度测量尺测得两面墙间距离为 2.643 m,利用激光雷达系统对目标区域的两面墙体间距离进行多次测量,测量误差如图 8 所示。20 次测量的误差最大值为 0.159 m,均方根误差为 0.104 m。

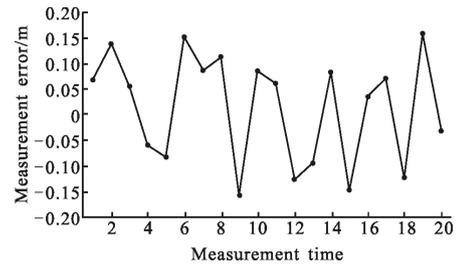


图8 激光雷达系统对固定目标测距误差

Fig.8 Range error of laser radar system for fixed target

利用激光雷达样机对距离为 100 m 远处尺寸为 0.998 2 m×0.999 4 m 的方形标准目标进行定距离多次成像。由所成三维图像信息得出被测目标长和高的测量误差如图 9 所示。

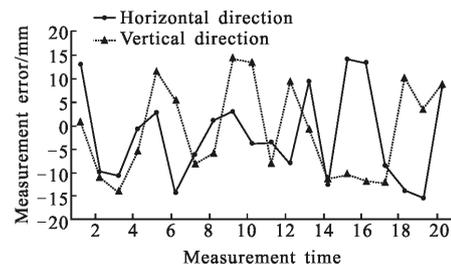


图9 激光雷达系统对方形标准目标测距误差

Fig.9 Range error of laser radar system for square standard target

对应方位角均方根误差为 $9.8 \mu\text{rad}$,俯仰角均方根误差为 $9.6 \mu\text{rad}$ 。

4 结论

文中提出了一种将 PZT 与振镜相结合的两级复合式激光扫描方法,分别对复合式扫描的发射系统、接收系统以及控制系统进行综合分析论述。通过理论分析、模型仿真与野外验证性试验证明了该方法的可行性,通过原理性验证试验,该复合式扫描激光雷达角分辨率达到 0.1 mrad,测距精度为 0.159 m。可见,该复合式扫描方法具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Tuley J, Vandapel N, Hebert M. Analysis and removal of artifacts in 3-d lidar data[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 2203-2210.
- [2] Surmann H, Lingemann K, Nüchter A, et al. A 3D laser range finder for autonomous mobile robots[C]//Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics), 2001, 19(21): 153-158.
- [3] Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren, et al. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (12): 1861-1867. (in Chinese)
瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861-1867.
- [4] Meng Zhaohua, Hong Guanglie, Hu Yihua, et al. Research on chirped amplitude modulation coherent lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2446-2450. (in Chinese)
孟昭华, 洪光烈, 胡以华, 等. 啁啾调幅相干探测激光雷达关键技术研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2446-2450.
- [5] Zheng Ruitong, Wu Guanhao. Pulsed one-dimensional scannerless LiDAR system based on linear APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 96-100. (in Chinese)
郑睿童, 吴冠豪. 基于线阵 APD 探测器的脉冲式一维非扫描激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 96-100.
- [6] Wu Lijuan, Li Li, Ren Ximing. 3D imaging simulation of APD arrays laser radar system based on Geiger mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(11): 2180-2186. (in Chinese)
吴丽娟, 李丽, 任熙明. 盖革模式 APD 阵列激光雷达的三维成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 40(11): 2180-2186.
- [7] Zhang Yong, Cao Xibin, Wu Long, et al. Influence of linear gain modulation lidar system parameters on ranging accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 925-929. (in Chinese)
张勇, 曹喜滨, 吴龙, 等. 线性增益调制激光雷达系统参数对测距精度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 925-929.
- [8] Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, et al. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 229-235. (in Chinese)
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 229-235.
- [9] Li Pengzhi, Yan Feng, Ge Chuan, et al. Open-closed loop iterative learning control of piezoelectric actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 414-419. (in Chinese)
李朋志, 闫丰, 葛川, 等. 压电驱动器的开闭环迭代学习控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 414-419.
- [10] 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.