

基于二分束的三角法激光测距研究

张灵宝, 祝 华

(浙江工业大学 理学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 为了实现激光测距仪小型化和低成本制作, 提出了一种新型的基于高斯光束二分束的三角法激光测距方法, 采用双 PIN 管探测器来替代传统三角法激光测距系统中的 CCD 或 PSD 光电检测单元, 实现光束的二分束; 利用光度学和高斯光束理论, 推导出两分束的光功率比与待测距离及发射角的关系, 并通过数值计算获得其关系图, 进而通过测量分束比计算出目标距离。试验结果表明, 本方法具有结构简单、精度高、对目标物颜色深浅不敏感等优越特性, 并具有良好的应用前景。

关键词: 激光测距; 三角法; 二分束; 背景噪声

中图分类号: TH744.5; O432.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2010)12-0040-04

Triangle method of laser range finding based on two-section beam technology

ZHANG Ling-bao, ZHU Hua

(College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Aiming at realizing the fabrication of miniaturized laser range finder with low cost, a new triangle method for laser range finding based on the two-section Gaussian beam was proposed. Double PIN photodiode was used to acquire two section beams, replacing CCD or PSD for traditional triangle method in laser range finder. The relationships among the power ratio of two section beams, the corresponding range and the emission angle were derived from the photometry and Gaussian beam theory. Some figures for the above relations were plotted by using numerical methods, and the range to the target could be calculated from the measured power ratio. The test results indicate that this method is possessed of the merits of simple structure, high resolution and less sensitive to the darkness of the target object.

Key words: laser range finding; triangle method; power ratio; background noise

0 引 言

激光具有方向性好、单色性好、亮度高等特点, 因此利用它作为测距的发射源有很多优势, 比如测量速度快、精度高、测程远等。随着半导体激光器的出现, 激光测距正向小型、快速、低功耗、低成本和人眼安全方向发展。目前激光测距技术主要有脉冲测距、相位测距、激光干涉法测距、激光三角法测距等^[1-5]。

脉冲激光测距的主要特点是单次测量时间短、测程远、无需合作目标、隐蔽和安全性能好。但测量精度相对较低, 一般为米级精度^[6-7]。相位激光测距, 其特

点是测量精度高, 能够达到毫米级别, 但要求使用连续激光器, 单次测量时间较长, 测量较远距离时, 需要在目标处放置合作目标。对于小型或便携式激光测距设备而言, 由于受到激光器功率的限制, 相位激光测距的测程一般不大, 通常为百米以内^[8]。干涉法激光测距, 其特点是测量精度较高(达到微米级)。但其测量精度容易受大气起伏的影响, 而且要求基座采用笨重的仪器设备。激光三角法测距, 其特点是简便、精度高, 适合测量微小位移。但其测量精度受光学系统和 CCD 成像系统分辨率的限制, 系统对接收器件的要求也比较高, 同时不能使用非匹配表面物体和透明物体作为被测目标^[9]。

本研究提出一种新型的基于二分束的三角法激光测距技术,与传统三角法激光测距成像系统中采用 CCD 或 PSD 作为光电检测单元所不同。本研究课题组创新地采用双 PIN 管探测器来替代 CCD 或 PSD,实现光束的二分束,通过检测两 PIN 管所接收的光功率比计算出目标距离。与传统三角法相比,本方法在光路结构和驱动电路设计上都大为简化,更容易实现小型化甚至微型化封装,也降低了激光测距仪的制作成本,同时还保持了厘米甚至毫米级的测量精度。

1 二分束三角法激光测距原理

二分束三角法激光测距的原理如图 1 所示,LD 为半导体激光器,发射准直激光束。本研究采用 A 和 B 两 PIN 管作为探测器,当物体在不同的位置(即物距不同时),探测器 A 和 B 接收到的光功率 P_A 和 P_B 不一样,它们的比值 η 也在变化,通过推导光功率比 η 与物距 U 和发射角 α 的关系,并进行数值计算,可求得待测距离值。在测量过程中经过二分束后求光功率比,可以巧妙地避开激光行程中的各种衰减,比如空气微粒的散射损失和被测物的吸收等等,从而可以在恶劣的环境中有稳定的测量精度。

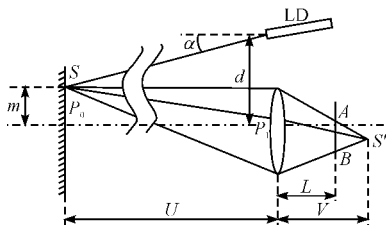


图 1 二分束三角法激光测距原理图

2 背景噪声

在实际的测距过程中,不可避免地存在着环境自然光的干扰,使得测距精度受到影响。因此必须考虑背景光功率,即背景噪声的影响,并对其进行计算,评估其对测距的影响,同时也为 LD 发射光源的设计提供相应的参考。

自然光情况下,在探测器上的背景光通量可以表示为^[11]:

$$P_b = L_\lambda A_s \cos \theta_s \Omega_D \Delta_\lambda T_R e^{-\sigma R} \quad (1)$$

式中 P_b —背景功率(阳光辐射强度); L_λ —阳光辐射强度; A_s —探测器接收的背景噪声面积; θ_s —目标法线和光学系统轴线夹角; Ω_D —探测器接收立体角; Δ_λ —光学滤波片带宽; σ —大气衰减系数; T_R —接受光学系统透射率; R —目标距离。

其中探测器接收的背景噪声面积:

$$A_s \approx \frac{\pi (R \beta_R / 2)^2}{\cos \theta_s} = \frac{\pi \beta_R^2 R^2}{4 \cos \theta_s} \quad (2)$$

式中 β_R —接受视场角。

接收立体角为:

$$\Omega_D \approx \frac{A_s}{R^2} = \frac{\pi D^2}{4 R^2} \quad (3)$$

式中 D —接收光学系统口径。

反射的阳光辐射强度为:

$$L_\lambda = \frac{E_\lambda \rho_b}{\pi} \quad (4)$$

式中 E_λ —阳光辐射照度; ρ_b —背景反射系数。

由以上 4 式可得(忽略衰减因子 T_R 和 $e^{-\sigma R}$):

$$P_b = \frac{\pi E_\lambda \rho_b}{16} \Delta_\lambda \beta_R^2 D^2 \quad (5)$$

由于接收系统有窄带滤波片,因而阳光辐射照度取常数是合理的。

本例计算考虑到正午太阳直射条件,选取的激光波长为 905 nm, $E_\lambda \approx 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, $D = 10 \text{ mm}$, $\Delta_\lambda = 10 \text{ nm}$, $\beta_R = 2 \arctan(5/30)$, $\rho_b = 0.8 \text{ Sr}^{-1}$,代入式(1)可得: $P_b \approx 1.5 \times 10^{-6} \text{ W} = 1.5 \mu\text{W}$,此结果为本研究选择合适的 LD 光源提供了实际参考。

3 光功率和光功率比

接收部分采用分隔开的双 PIN 管探测器 A 和 B (如图 2 所示)。若目标物体上的单位点光源在光轴上,则探测器 A、B 所检测的光功率比为 1,可以根据几何关系直接求出距离。若单位点光源不在光轴,则在靠近探测器方向上,探测器 A、B 的光功率比小于 1,反之则大于 1。通过对光功率比的计算,可以确定目标物体的距离。

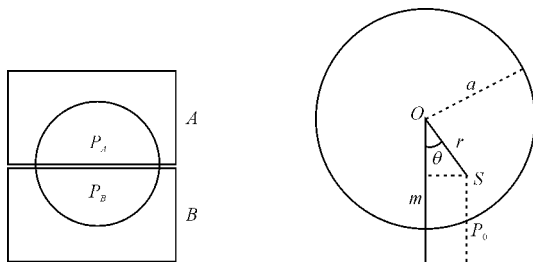


图 2 探测器上光通量分布 图 3 光斑上点光源的极坐标

光路如图 3 所示,设 $S(r, \theta)$ 为光斑上任意点光源,它在垂直方向的投影到透镜光轴的距离为 P_0 ,于是有下列关系:

$$\begin{cases} P_0 = m - r \cos \theta \\ m = d - U \tan \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中 m —光斑中心到透镜法线的距离; d —激光发射点与透镜光轴的距离; α —高斯光束与透镜法线的夹角; (r, θ) — S 点的极坐标。

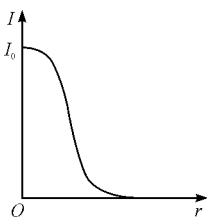


图 4 光斑光强的高斯分布

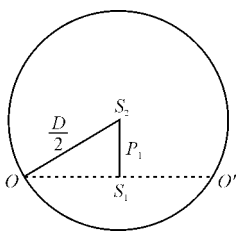


图 5 透镜面上光通量分布

如图 4 所示,经目标物体反射后光束的截面光强为高斯分布,则 $S(r, \theta)$ 点的光强可表示为:

$$I = I_0 e^{-r^2/a^2} \quad (7)$$

式中 I_0 —单位光强; a —光斑直径。

S' 为 S 的像点,它与探测器分隔线构成一平面,此平面与透镜面相交,设交线为 OO' (如图 5 所示)。点光源 S 在接收透镜面的光通量,交线 OO' 以上部分,都被探测器 A 接收,交线 OO' 以下部分,都被探测器 B 接收。 P_1 为交线 OO' 在纸面内的投影到透镜中心的距离。则由成像公式和三角形相似性可得:

$$P_1 = \frac{P_0 f L}{f U + f L - U L} \quad (8)$$

式中 U —待测距离; f —透镜焦距; L —探测器到透镜的距离。

透镜面上,交线 OO' 以上部分的面积记为 S_1 ,交线 OO' 以下部分的面积记为 S_2 。根据几何关系和三角形面积公式,可得透镜上半部分面积 S_1 为:

$$S_1 = \frac{1}{8} D^2 \arccos \left(\frac{2P_1}{D} \right) - D P_1 \sin \left(\arccos \left(\frac{2P_1}{D} \right) \right) \quad (9)$$

式中 D —透镜直径。

透镜下半部分面积 S_2 为:

$$S_2 = \frac{1}{8} D^2 \left(2\pi - \arccos \left(\frac{2P_1}{D} \right) \right) + D P_1 \sin \left(\arccos \left(\frac{2P_1}{D} \right) \right) \quad (10)$$

探测器 A 接收的光功率为:

$$P_A = \iint_S I \Omega_1 dS = \iint_S \frac{I S_1}{U^2} dS \quad (11)$$

式中 Ω_1 —点 S 和面 S_1 组成的立体角。

探测器 B 接收的光功率为:

$$P_B = \iint_S I \Omega_2 dS = \iint_S \frac{I S_2}{U^2} dS \quad (12)$$

式中 Ω_2 —点 S 和面 S_2 组成的立体角。

在实际测距中采用的半导体激光器功率往往是几

十毫瓦,经物体反射回来的光功率在几十微瓦左右。考虑滤波片和大气衰减等因素,背景光功率一般在 10 ~ 100 nW 左右,可见光功率远大于背景光功率,因此信噪比很高^[12-13]。这样在计算光功率比时,可以忽略背景光功率对测量的影响。同时测量的物距 $U \gg D$ (D 为透镜直径),因此两探测器的光功率比可作如下近似:

$$\eta = \frac{P_A}{P_B} = \frac{\iint_S I \Omega_1 dS}{\iint_S I \Omega_2 dS} = \frac{\iint_S I S_1 dS}{\iint_S I S_2 dS} \quad (13)$$

将式(6)~式(12)代入式(13)得:

$$\eta = \frac{\int_0^a \int_0^\pi S_1 e^{-r^2/a^2} d\theta dr}{\int_0^a \int_0^\pi S_2 e^{-r^2/a^2} d\theta dr} = \frac{\int_0^a \int_0^\pi P_{AS} d\theta dr}{\int_0^a \int_0^\pi P_{BS} d\theta dr} \quad (14)$$

其中:

$$P_{AS} = e^{-r^2/a^2} \left[\frac{D^2}{8} \arccos \left(\frac{2fL(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)}{D(fU - LU + Lf)} \right) - \frac{fL(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)}{\frac{\sqrt{D^2(fU - LU + fL)^2 - f^2 L^2(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)^2}}{2(fU - LU + fL)^2}} \right] \quad (15)$$

$$P_{BS} = e^{-r^2/a^2} \left[\frac{D^2}{8} \left(2\pi - \arccos \left(\frac{2fL(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)}{D(fU - LU + Lf)} \right) \right) + \frac{fL(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)}{\frac{\sqrt{D^2(fU - LU + fL)^2 - f^2 L^2(d - U \tan \alpha - r \cos \theta)^2}}{2(fU - LU + fL)^2}} \right] \quad (16)$$

4 数值模拟

本研究采用的系统参数为: $a = 3$ mm, $d = 20$ mm, $D = 10$ mm, $f = 5$ mm, $L = 3$ mm。利用蒙特卡罗方法对式(14)进行数值积分计算, r 的取值范围为 $[0, 3]$, θ 的取值范围为 $[0, \pi]$ 。利用 Matlab 编程进行计算,可以得到光功率比 η 与物距 U 和发射角 α 的关系图。

在发射角 α 固定下,计算得到的光功率 η 比与物距 U 的关系如图 6 所示。

由图 6 可知,在发射角一定的情况下,随着测量距离增加,光功率比 η 也增大。当距离增加到一定值时, η 接近一个常数,这是由于距离越大,通过透镜的光能量很小,对两个探测器来说,检测到的光强基本都保持不变,因此光功率比就不变。此时要测到较远的距离,可以通过调整发射角 α ,使其比值接近于 1,从而

测得准确的距离。

在物距 U 固定下,计算得到的光功率比 η 与发射角 α 的关系图如图 7 所示。

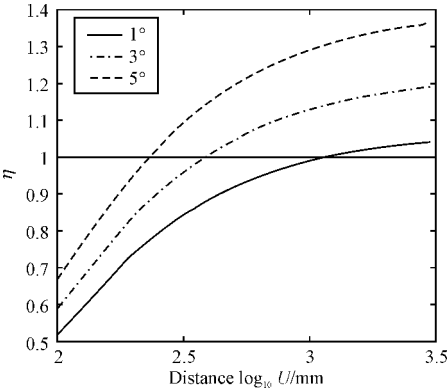


图 6 光功率比 η 与物距 U 的关系

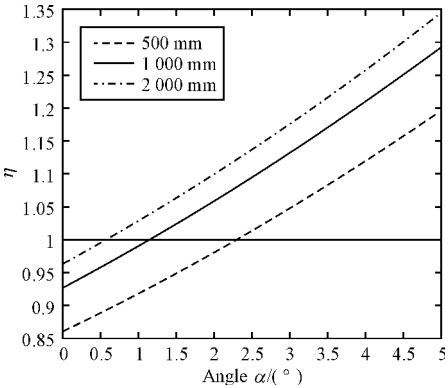


图 7 光功率比 η 与发射角 α 的关系图

由图 7 可知,在测量物距 U 一定的情况下,发射角越大,光功率比也越大。但是当角度接近一定的角度时,其比值无穷大,这是由于当发射角 α 变大时,只有探测器 A 能够探测到光,探测器 B 探测不到。

计算得到的光功率比 η 与发射角 α 和物距 U 关系图如图 8 所示。

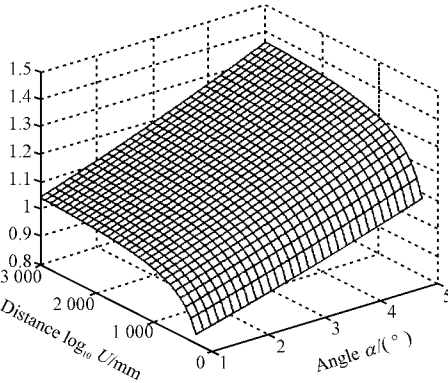


图 8 光功率比 η 与发射角 α 和物距 U 关系图

由图 8 可以看出:光功率比 η 与待测距离 U 、发射角 α 存在非线性关系。因而可以将理论计算的结果

进行严格修正,制成二维数据表,供查表时用。在实际应用中通过查表方式,可以加快硬件处理速度和提高测量精度。

5 结束语

本研究从光度学理论出发,讨论了二分束三角法激光测距的基本原理,并推导出两分束的光功率比与待测距离及发射角的关系,通过数值积分计算获得其关系图,进而通过测量分束比得出目标距离。本方法具有与目标物颜色深浅不相关、体积小、成本低、精度高等优越特性,具有良好的应用前景,在中、近程测距方面有明显优势。但是由于半导体输出能量低而使得测程偏低,目前实际制作的小型测距仪测程范围为 100 m,测量精度为 ± 10 mm,可以应用在近程非接触物体的测量、定距系统以及短距离传感器等方面^[14]。

(1) 本研究提出的三角法测距方法采用双 PIN 管代替传统的 CCD 和 PSD 探测器,可实现小型化封装,从而大大降低制作成本。

(2) 测距系统的接收光来自被测物表面对发射光的漫反射,探测器接收光功率比可以根据式(14)求出,通过查表方式,得到待测距离。

(3) 提高发射的激光功率,或者减少探测器接收视场角,可以减少背景噪声对探测器带来的影响。

参考文献 (References) :

- [1] 王古常,孙 斌. 军用脉冲激光测距技术与研究现状[J]. 光学与光电技术,2003,10(4):55-59.
- [2] CHENG H H, SHAW B D. Development and field test of a laser-based nonintrusive detection system for identification of vehicles on the highway [J]. **IEEE Trans. intelligent Transp Syst.**,2005,6(2):147-155.
- [3] SCHAELE U, ROTHE H. Application of an eye-safe laser-based measurement system with 1574 nm wavelength for object detection in km range[J]. **Tech. Mess.**,2002,69(9):381-389.
- [4] 陆富源. 一种新型短距离高精度激光测距仪的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学航天学院,2003:3-35.
- [5] 宋 敏. 远程激光测距控制系统的设计与研究[D]. 成都:四川大学原子与分子物理研究所,2004:9-21.
- [6] 吕晓玲. 半导体激光测距接收系统研究[D]. 长春:长春理工大学电子信息工程学院,2006:5-25.
- [7] 鲍星合. 小型激光测距仪[D]. 上海:中科院上海光举精密机械研究所,2005:5-18.
- [8] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京:中国农业出版社,2002.

(下转第 48 页)

动;第 4 阶模态:上下箱体绕着 x 轴转动振动,中间肋板处和上轴承座处变形较大;第 5 阶模态:上下箱体沿着 x 轴负向振动,中间隔板处出现较大变形,下轴承座出现严重的凸出变形;第 6 阶模态:在第 5 阶模态振动的基础上加上了上箱体沿 z 轴的振动,下轴承座的凸起加剧。

由上述振型描述可以得出,在加强筋与箱体连接区域及轴承座位置振动幅度较大,这与传动箱在实际工作中的破坏位置相吻合,所以应对以上区域进行刚度增强,提高其动态性能。

4 结束语

在完成了整地机传动箱内部传动部件运动参数设计的基础上,利用三维建模软件和有限元软件对其关键部件进行了 CAE 分析,得出主动轴的应力集中在阶梯轴处;虽然有应力集中,但是通过最大应力和极限应力分析得出,其安全系数满足设计要求,并提出了改进措施;得出了传动箱的振动频率和前几阶振型,为提高其动态性能提供了依据。

研究表明,该研究为农业整地机械的结构设计和优化设计提供了设计理论基础,具有一定的实际应用意义。

参考文献 (References):

- [1] GITEA L P, YADAVA B G. Anthropometric survey for agricultural machinery design: an indian case study[J]. **Applied Ergonomics**, 1989, 20(3): 191 – 196.
- [2] SCHÄFFER B, ATTINGERA W, SCHULINA R. Compact-

tion of restored soil by heavy agricultural machinery—soil physical and mechanical aspects[J]. **Soil and Tillage Research**, 2007, 93(1): 28 – 43.

- [3] 刘海峰,刘志成,高延波. 灭茬旋耕联合整地机的现状及发展趋势[J]. **农业与技术**, 2009, 29(6): 141 – 413.
- [4] 王扬渝,张立彬,计时鸣,等. 可重构小型农业作业机变速箱体实验模态分析[J]. **农机化研究**, 2009(7): 189 – 191.
- [5] 黄 巍. CAE 技术的发展与在农业机械设计中的应用[J]. **现代农业科学**, 2008, 15(12): 106 – 107.
- [6] 桑一萌. 基于有限元法的泵轴强度分析[D]. 江苏:江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2007.
- [7] HAN R P S, ZU J W Z. Modal analysis of rotating shaft a body-fixed axis formulation approach[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1992, 156(1): 1 – 16.
- [8] MOAVENI S. 有限元分析—ANSYS 理论与应用[M]. 3 版. 王 崧,刘丽娟,董春敏,等,译. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [9] 尚晓江. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 2 版. 北京:水利水电出版社, 2008.
- [10] 于建伟,刘晓平. ANSYS 中的参数化建模方法研究[J]. **机械**, 2008, 35(3): 21 – 22.
- [11] ANTHONIS J, KENNES P, RAMON H. Design and evaluation of a low-power mobile shaker for vibration tests on heavy wheeled vehicles[J]. **Journal of Terramechanics**, 2000, 37(4): 191 – 205.
- [12] 尚勇智,章巧芳,彭 伟. 基于 ANSYS 软件的气动钉枪枪针组件的有限元分析[J]. **轻工机械**, 2009(6): 87 – 90.
- [13] 石 峰. 基于 ANSYS 软件的注塑机定模板的设计与优化[J]. **轻工机械**, 2008(4): 13 – 16.

[编辑:柴福莉]

(上接第 43 页)

- [9] 张永枫. 光三角式传感器测距系统[J]. **传感器技术**, 2001, 20(7): 37 – 39.
- [10] MATTEI S, SANTOVITO M R, MOCCIA A. A new rangefinder system for micro-satellite [C]//**Laser radar technology for remote sensing**, Proc. SPIE, 2004: 17 – 25.
- [11] 高剑波. 脉冲半导体激光测距电路与系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2006: 7 – 12.
- [12] UTKIN A B, LAVROV A. Laser rangefinder architecture

as a cost-effective platform for lidar fire surveillance[J]. **Optics & Laser Technology**, 2009, 41(7): 862 – 870.

- [13] CORDOBA A, VILAR R, UTKIN A B, et al. Multi-objective optimization of lidar parameters for forest-fire detection on the basis of a genetic algorithm[J]. **Opt. & Laser Technol.**, 2004, 36(5): 393 – 400.
- [14] 符 建. 一种激光几何定距系统: 中国, 200810061714. 8 [P]. 2008 – 10 – 15.

[编辑:柴福莉]