

基于激光测距的树高和胸径测量方法与研究

关晓平, 李国辉, 马岩, 杨春梅, 黄万征

(东北林业大学 林业与木工机械工程技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为提高森林资源的调查效率以及准确掌握与树木相关的重要参数,对基于激光测距的测定树高和胸径的方法进行了介绍,并对脉冲激光测距原理、三角高程法的测量原理以及精度计算进行分析,通过实例分析进行验证。结果表明,与传统的树高和胸径的测量方法相比,激光测距不仅测量精度高,而且效率高,具有很高的应用价值。

关键词:激光测量;树高测量;胸径;三角高程法

中图分类号: S758.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3776 (2017) 04-0082-07

Laser Ranging of Tree Height and DBH

GUAN Xiao-ping, LI Guo-hui, MA Yan, YANG Chun-mei, HUANG Wan-zheng

(Forestry and Woodworking Machinery Engineering Centre, Northeast Forestry University, Heilongjiang, Harbin 150040, China)

Abstract: Principles and operation of laser ranging was introduced, for improving efficiency of forest resources monitoring and accuracy of tree traits. Instance analysis of tree height and DBH was verified. The results showed that compared with traditional measurement methods, laser ranging had advantages of higher accuracy and much more effective for measurement.

Key words: laser ranging; tree height measurement; DBH; trigonometric leveling

近几年来,测树仪器在森林资源调查的工作中扮演着越来越重要的角色^[1]。皮尺等传统工具测量相关数据时,必须把树木砍倒,不仅造成森林资源浪费,破坏森林系统的生态平衡,而且在坡面上测量时,必须进行斜坡距离和水平距离换算,工作量大且繁琐,效率低,不利于对测量精度的把握,影响后续工作^[2-4]。

现在一般采用的森林资源调查方法是目测法和手工测量法,不仅效率低,测量精度也不高。国外比较先进的树高测量仪,例如全站仪、经纬仪等测量精度高,但是成本高,目前国内应用比较少^[5-7]。我国森林资源调查人员用如橡皮、尺子等工具简单,测量时人为因素对测量结果影响很大,不利于统计测量结果^[8];工作人员在测量相关数据时会碰到如树林的茂密程度,地面凹凸不平等问题,都会给工作人员带来极大的困难。因此,改变传统树木测量方法,才会改变我国森林资源调查落后的局面。

中国是森林资源大国。树木的生长评价指标是树高和胸径,因此测量树木的树高和胸径意义重大。目前测量树高的方法有两种:一种是立木测量,一种是伐倒木测量^[8]。伐倒木测量对树木伤害过大,不利于统计森林资源。传统的树高和胸径测量方法繁琐且精度极低,本论文引进了激光测量技术,不仅测量精度高,而且工作效率高。激光测量技术在森林资源调查中的应用,将极大的推动我国林业相关工作的发展。

收稿日期: 2017-02-11; 修回日期: 2017-05-23

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项 (201504508)

作者简介: 关晓平, 教授, 博士, 从事木工机械研究; E-mail: guanxiaoping01@163.com。通信作者: 马岩, 教授, 硕士, 从事木工机械研究; E-mail: myan@vip.163.com。

1 激光测距原理

激光测距原理可以分为两类: 一种是脉冲激光测距, 另一种是连续激光相位测距。第一种激光测试仪, 既有发射系统, 又有接收系统, 发射系统向被测目标物发射脉冲激光, 通过测量发射脉冲激光到接收脉冲激光的时间, 进而得到目标距离。第二种测距用无线电波段的频率对激光束进行幅度调制, 并确定调制光往返一次所产生的相位延迟, 根据调制光的波长, 换算出相位延迟所代表的距离, 再由此计算出激光往返所需的时间, 从而计算出需要测量的距离^[9-12]。由于林间作业复杂, 测量距离多变, 相位测距主要用于短程距离。本文中采用的是脉冲激光测量, 原理图如图 1 所示。

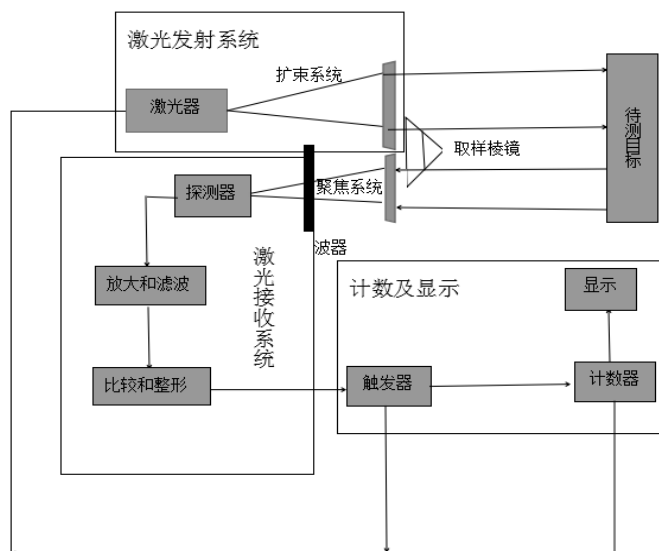


图 1 激光测量原理图

Figure 1 Principle of laser ranging

由图 1 可知, 激光测距系统主要有激光发射系统、激光接收系统、计数及显示部分组成。激光测距仪向待测目标发射激光束, 通过扩束系统把 1 个激光束分成 2 个激光束, 反射回来的 2 个激光束通过取样棱镜和扩束系统被探测器接收, 并且对反射波进行放大和滤波以及比较和整形, 得到的送到触发器和计数器从而在显示器上显示出来。

2 树高的测量

树高测量对林业生产、科研、教学和森林调查非常重要, 是评价立地质量和林木生长状况的重要依据。现在采用最多是利用测高器进行立木测定。市场上测树高的仪器种类很多, 圆筒测高器、布鲁莱斯测高器、克里斯登测高器, 测杆、比例测高器等^[13], 由于上述测高器被广泛使用。布鲁莱斯测高器具有携带方便、结构简单、测量精度高等优点而受到青睐。传统树木的重要因子——树高、胸径、材积等都是把树木伐倒进行测定, 不伐倒非常困难^[14-16]。以往需要测量相关数据是在测定了胸径后下计算, 或者使用一些功能比较单一的测树仪器, 需要测量多个因子, 要用到多种专门仪器。这样虽然达到了测量目的, 但需要大量人力、物力, 精度也不高。所以, 激光测距测量树高和胸径, 一台测量仪可以实现多个功能, 比如测距, 测量角度等, 方便快捷; 现代的测高仪器原理基本上都是采用了三角高程法的测量方法^[13], 因此我们对三角高程法的测量方法进行讨论分析。

2.1 三角高程法的测高原理

模型一: 当被测树木处于斜面时, 激光测距仪测距原理如图 2 所示。

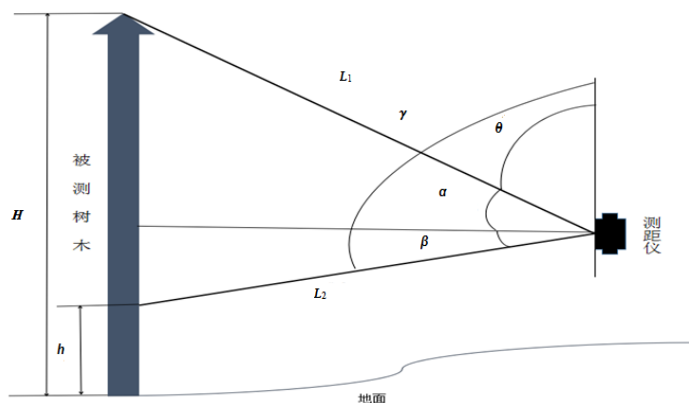


图 2 斜坡上的测高原理图

Figure 2 The principle of height measurement on slope

将测距仪放在一定距离处（距离根据实际情况调整）。其中， h 为能用测距仪观测到的树的底部到观测点的距离（对观测点进行标示，以便观察），可以用皮尺测出来； H 为待测树木的高度； L_1 为测距仪发射点向树顶发射激光束测得的值； L_2 为测距仪发射点向观测点发射激光束测得的值； θ 用望远镜瞄准树顶可以测得树顶处的天顶距； γ 用望远镜瞄准测得 h 处的天顶距； α 、 β 为求树高 H 需要计算的物理量，其计算方法为：

$$\alpha = 90^\circ - \theta, \quad \beta = \gamma - 90^\circ \quad (1)$$

综上所述， L_1 、 L_2 、 γ 、 θ 、 α 、 β 都是已知量， H 是未知量。

由几何关系可知树高的计算公式为：

$$\begin{aligned} H &= h + L_1 \sin \alpha + L_2 \sin \beta \\ &= h + L_1 \sin(90^\circ - \theta) + L_2 \sin(\gamma - 90^\circ) \\ &= h + L_1 \cos \theta - L_2 \cos \gamma \end{aligned} \quad (2)$$

测量过程中，存在人为的误差，因此必须对计算精度进行微分，对式（2）进行全微分处理得到：

$$dH = dL_1 \cos \theta - L_1 \sin \theta \frac{d\theta}{\rho} - \cos \gamma dL_2 - L_2 \sin \gamma \frac{d\gamma}{\rho} + dh \quad (3)$$

$$m_H^2 = \cos^2 \theta m_{L_1}^2 + L_1^2 \sin^2 \theta \frac{m_\theta^2}{\rho^2} + \cos^2 \gamma m_{L_2}^2 + L_2^2 \sin^2 \gamma \frac{m_\gamma^2}{\rho^2} + m_h^2 \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{内}} = \sqrt{\sum m_H^2 / n}, \quad \sigma_{\text{外}} = \sqrt{\sum \Delta x^2 / n} \quad (5)$$

式中， $\Delta x = x_i - x_0$ ， x_0 为真值， x_i 为实验所得， n 为测量的数据组数。

测量误差为：

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{x\text{外}}^2 + \sigma_{x\text{内}}^2} \quad (6)$$

式中，误差精度为 σ_x / x_0 ，不超过 5%。

模型二：当被测树木位于平面上时，激光测距仪测距原理图如图 3 所示。

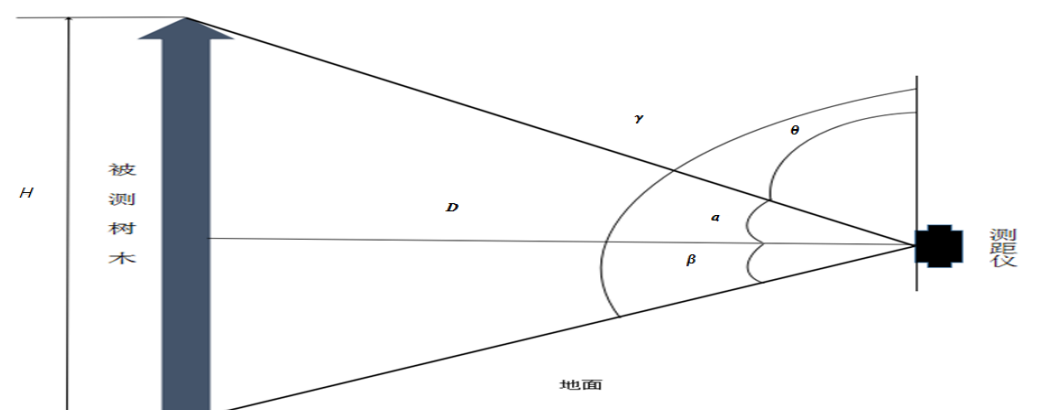


图 3 平面上的测高原理图

Figure 3 The principle of height measurement on plane

将测距仪放到合适的位置，用望远镜观测激光发射器发射的两束激光刚好照在被测树木的树顶和树的底部。

其中， H 为待测树木的高度，是要计算的量； D 为激光发射器距被测树木的距离； θ 用望远镜瞄准树顶可以测得树顶处的天顶距； γ 用望远镜瞄准测得 h 处的天顶距； α 、 β 为求树高 H 需要计算的物理量，其计算方法为：

$$\alpha = 90^\circ - \theta, \beta = \gamma - 90^\circ \quad (7)$$

综上可知 α, β, γ 都是已知量, H 是未知量。

由几何关系可得待测树木的高度 H 为:

$$\begin{aligned} H &= D \tan \alpha + D \tan \beta \\ &= D \tan (90^\circ - \theta) + D \tan (\gamma - 90^\circ) \\ &= D \cot \theta - D \cot \gamma \end{aligned} \quad (8)$$

对上式子进行全微分处理得到:

$$dH = dD \cot \theta - D \csc^2 \theta d\theta / \rho - dD \cot \gamma + D \csc^2 \gamma d\gamma / \rho \quad (9)$$

同理, 对测量精度进行分析: 该模型对应的内附精度的计算方法如下:

$$m_H^2 = (\cot \theta - \cot \gamma)^2 m_D^2 + \left(\csc^2 \gamma m_\gamma^2 / \rho^2 + \csc^2 \theta m_\theta^2 / \rho^2 \right) D^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{内}} = \sqrt{\sum m_H^2 / n}, \sigma_{\text{外}} = \sqrt{\sum \Delta x^2 / n} \quad (11)$$

式中, $\Delta x = x_i - x_0$, x_0 为真值, x_i 为实验所得, n 为测量的数据组数。

测量误差为:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{x\text{外}}^2 + \sigma_{x\text{内}}^2} \quad (12)$$

误差精度为 σ_x / x_0 , 要求误差精度不超过 5%。

3 胸径的测量

胸径是指立木树干距离地面 1.3 m 处的直径。测量胸径就是对待测树木胸径处的横截面的直径进行测量。因此想要确定胸径的数值, 就必须计算胸径处的截面直径。胸径测量的原理如图 4 所示。

从图 4 看出, 测距仪向待测树木发射两条能够看见的定位激光束, 使两束定位激光恰好照射在树的两个边上, 由几何关系就可求得待测树木的胸径 D :

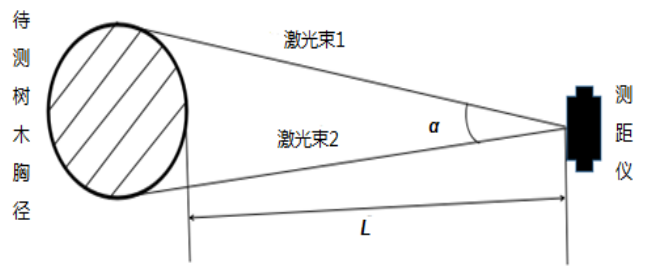


图 4 胸径测量原理图
Figure 4 Principle of measurement of DBH

$$D = 2L \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (13)$$

式中, D 为被测立木树干的直径; L 为测距仪与被测立木的水平距离; α 为测距仪发出的两条激光束的夹角。

同理对其内附精度进行计算, 对两边取全微分处理得到:

$$dD = 2dL \tan \frac{\alpha}{2} + L \sec^2 \frac{\alpha}{2} \frac{d\alpha}{\rho} \quad (14)$$

$$m_D^2 = 4m_L^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2} + L^2 \sec^4 \frac{\alpha}{2} \frac{m_\alpha^2}{\rho^2} \quad (15)$$

$$\sigma_{y内} = \sqrt{\frac{\sum m_D^2}{n}}, \sigma_{y外} = \sqrt{\frac{\sum \nabla^2 y}{n}}$$

(16)

式中， $\nabla y = y_i - y_0$ ， y_0 为真值， y_i 为实验测得值， n 为测量的数据组数

测量误差为：

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y内}^2 + \sigma_{y外}^2}$$

(17)

误差精度为 σ_y/y_0 ，要求误差精度不能超过 5%。

4 数据观测与实例分析

4.1 模型一测量数据与精度计算

在东北林业大学实验林场内随机找一棵树，用全站仪（TOPCON，型号为 GTS-102N，测量精度 $\pm 1\text{ mm}$ ）测得该树的高度为 11.704 m，由于全站仪的测量原理是三角高程法，精度高，作为测量结果的参考值。然后用测树仪（HCJYET HT-40，测量精度 $\pm 1.5\text{ mm}$ ）对该树进行 20 组相关数据的测量（ h 的取值为 1.3），并对测量数据和精度进行分析，详见表 1。通过对测得的数据 ∇x 和 m_H 进行分析计算得到，测量误差为 $\sigma_x = 0.251\ 5$ ，误差精度为 $\sigma_x / x_0 = 0.251\ 5 / 11.704 = 0.021\ 5 < 5\%$ ，可以满足测量精度要求。

表 1 模型一的测量数据
Table 1 Model 1 measurement data

序号	h/m	L_1/m	L_2/m	θ	γ	H/m	m_H/m	$\Delta x/\text{m}$
1	1.3	6.523	7.245	36°12'14"	134°24'12"	11.633	0.024 563	-0.071
2	1.3	6.645	7.782	36°34'16"	133°48'24"	12.024	0.024 246	0.321
3	1.3	6.425	7.658	37°15'27"	133°42'24"	11.705	0.024 323	0.001
4	1.3	7.042	6.851	37°24'32"	134°32'14"	11.699	0.024 524	-0.005
5	1.3	6.524	7.426	37°24'23"	133°46'52"	11.620	0.024 326	-0.084
6	1.3	6.325	7.586	36°45'24"	134°52'42"	11.720	0.024 562	0.016
7	1.3	6.853	6.954	35°55'42"	134°32'24"	12.184	0.024 159	0.484
8	1.3	7.156	7.256	36°13'32"	134°23'12"	12.148	0.024 489	0.444
9	1.3	6.826	6.982	35°45'14"	133°32'56"	11.650	0.024 578	-0.054
10	1.3	6.925	7.436	36°15'23"	134°24'15"	12.087	0.024 524	0.383
11	1.3	6.423	7.648	37°14'43"	133°40'40"	11.804	0.024 432	0.100
12	1.3	6.725	6.894	35°40'24"	133°30'45"	11.620	0.024 532	-0.084
13	1.3	6.824	6.930	35°44'15"	133°33'42"	11.647	0.024 570	-0.057
14	1.3	6.536	7.545	36°25'24"	134°15'25"	11.612	0.024 142	-0.092
15	1.3	6.614	7.642	36°30'02"	133°42'12"	11.812	0.024 204	0.108
16	1.3	6.732	6.804	35°40'24"	133°31'24"	11.680	0.024 560	-0.024
17	1.3	6.586	7.587	37°24'15"	133°45'43"	11.642	0.024 480	-0.062
18	1.3	6.735	6.904	35°40'34"	134°24'15"	11.580	0.024 560	-0.124
19	1.3	6.825	6.980	35°45'10"	133°32'50"	11.649	0.024 580	-0.055
20	1.3	6.920	7.324	36°15'20"	134°24'20"	11.652	0.024 498	0.052

4.2 模型二测量数据与精度计算

在东北林业大学实验林场内，随机找一棵长在平面上的树，测距仪与被侧树木距离为 D ，同理用全站仪（型号同上）测得树高 11.236 m，把该值作为参考值，并用测树仪（型号同上）测得 20 组相关数据，详见表 2。

通过对测得的数据 ∇x 和 m_H 进行分析计算得到，测量误差为 $\sigma_x = 0.275\ 4$ ，误差精度为 $\sigma_x / x_0 = 0.275\ 4 / 11.236 = 0.024\ 5 < 5\%$ ，满足测量精度要求。

表 2 模型二的测量数据
Table 2 Model 2 measurement data

序号	D/m	θ	γ	H/m	m_H/m	$\Delta x/\text{m}$
1	4	33°24'16"	140°24'40"	10.902	0.026 324	-0.334
2	5	37°36'34"	136°02'11"	11.675	0.026 370	0.439
3	6	42°14'12"	130°16'36"	11.693	0.026 420	0.457
4	7	48°23'16"	125°32'14"	11.218	0.026 320	-0.018
5	8	53°16'32"	121°12'46"	10.816	0.026 432	-0.420
6	9	55°23'19"	117°32'21"	10.904	0.026 872	-0.332
7	10	57°33'12"	115°24'20"	11.107	0.026 754	-0.130
8	11	58°19'28"	112°23'29"	11.319	0.026 625	0.083
9	12	60°17'36"	109°12'32"	11.028	0.026 321	-0.208
10	13	62°32'29"	107°16'23"	10.798	0.026 752	-0.044
11	14	64°30'20"	105°20'25"	11.104	0.026 548	-0.132
12	15	67°24'16"	103°46'25"	11.071	0.026 486	-0.165
13	16	69°26'13"	100°54'29"	11.265	0.026 329	0.029
14	17	73°16'43"	97°24'54"	11.492	0.026 423	0.256
15	18	75°24'16"	93°25'12"	11.080	0.026 550	-0.156
16	19	72°32'14"	90°45'32"	11.204	0.026 584	-0.032
17	20	68°25'19"	86°15'32"	11.394	0.026 542	0.158
18	21	63°32'32"	83°21'23"	11.201	0.026 852	-0.035
19	22	60°54'34"	79°24'54"	11.301	0.026 459	0.065
20	23	54°56'13"	74°20'21"	11.182	0.026 548	-0.054

4.3 胸径测量数据与精度计算

在东北林业大学的林场中任选一棵树木, 用胸径尺测得其胸径为 52.3 cm, 把该数据当作参考值。激光测距仪进行测量时, 要先确定大体位置 (因为激光器的合适位置要不断调整才能最后确定), 然后打开激光器的定位系统, 逐步调整激光测距仪距离被测树木的相对距离, 直到定位激光发射器发出的两束激光恰好照射在被测树木上, 这时再打开激光测距器, 从而获得测距仪与被测树木的水平参数 D , 然后根据几何关系, 仪器的数据处理单元经过计算即可得到被测树木的胸径值。用激光测距仪器测得 20 组相关数据, 详见表 3。

表 3 胸径测量的数据
Table 3 Measured DBH

序号	L/m	α	D/cm	m_D/m	$\Delta y/\text{m}$
1	2.0	14°24'32"	50.6	0.006 245	-0.017
2	2.5	12°22'14"	53.5	0.006 215	0.012
3	3.0	10°19'32"	54.2	0.006 235	0.019
4	3.5	8°35'12"	52.8	0.006 256	0.005
5	4.0	7°23'33"	51.7	0.006 127	-0.006
6	4.5	6°20'25"	52.4	0.006 259	0.001
7	5.0	5°45'23"	50.3	0.006 312	-0.020
8	5.5	5°32'34"	51.3	0.006 132	-0.010
9	6.0	4°54'13"	51.4	0.006 023	-0.009
10	6.5	3°45'21"	50.8	0.006 148	-0.015
11	7.0	3°58'56"	48.7	0.006 025	-0.036
12	7.5	3°55'26"	53.8	0.006 326	0.015
13	8.0	3°52'32"	54.1	0.006 532	0.018
14	8.5	3°40'34"	54.3	0.006 465	0.020
15	9.0	3°27'32"	54.4	0.006 236	0.021
16	9.5	3°15'39"	53.2	0.006 319	0.009
17	10.0	3°2'16"	53.0	0.006 239	0.007
18	10.5	2°58'16"	54.1	0.006 187	0.018
19	11.0	2°42'16"	51.9	0.006 219	-0.004
20	11.5	2°29'23"	52.9	0.006 286	0.006

通过对测得的数据 ∇_y 和 m_D 进行分析计算得到, 测量误差为 $\sigma_y = 0.018$ 1, 误差精度为 $\sigma_y/y_0 = 0.018$ 1/0.523 = 0.034 6<5%, 可以满足测量精度要求。

5 结论

激光测距仪在平面和斜坡进行实测,利用三角高程法的原理进行相关的计算,并对计算结果的精度进行定量分析,树高和胸径的测量误差分别为 2.15 % (模型 2 的测量误差为 2.45 %) 和 3.46 %,测量误差均小于 5%。

激光测距仪不仅能测树木的高度,也可测胸径,方便快捷。激光测距仪是基于三角高程法的测量原理对树木进行测量,对其测量的数据进行分析处理,试验结果表明,三角高程法测量方法可以作为测树的方法。

传统的树高和胸径测量仪器亟待更新换代,基于三角高程法的激光测距应用于森林资源体系调查中。

致谢:感谢关晓平、马岩和杨春梅老师的悉心指导!感谢黄万征同学的帮助!

参考文献:

- [1] 姚天斌. 三维激光扫描仪在测树中的创新应用[J]. 现代园艺, 2016, 8 (4), 225.
- [2] 秦庆伟. 激光测量车技术在工程测量中的应用[J]. 地理空间信息, 2015, 13 (4), 130 - 132.
- [3] Sun H, Zhang H F, Zhang Z P, *et al.* Experiment on diffuse reflection laser ranging to space debris and data analysis[J]. Res Astronom Astrophys, 2015, 15 (6): 909 - 917.
- [4] Zhao P, Zhang Y, Qian W P, *et al.* Investigation of Geiger-mode detector in multi-hit model for laser ranging[J]. Sci Chin Technol Sci, 2015, 58 (5): 943 - 950.
- [5] 郑大青, 陈伟民, 陈丽, 等. 一种基于相位测量的快速高精度大范围的激光测距法[J]. 光电子·激光, 2015, 26 (2): 303 - 308.
- [6] 杨芳, 张鑫, 贺岩, 等. High speed pseudorandom modulation fiber laser ranging system[J]. Chin Optics Lett, 2014, 12 (8): 83 - 86.
- [7] 陈羽. 高精度脉冲激光测距仪的研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2014.
- [8] 闫伟, 马岩. 基于激光测距的树高测量方法研究[J]. 林业机械与木工设备, 2012, 40 (2): 30 - 32.
- [9] 李兵. 激光测量技术在大型隧洞开挖测量中的应用[J]. 水电站设计, 2012, 28: 22 - 25.
- [10] 李秀华, 庄新, 宋立明. 激光测距技术探究[J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2012, 04: 39 - 41.
- [11] 赵彤, 王冰洁, 王安帮, 等. A Laser Ranging System Using Chaotic Light[J]. J Measur Sci Instrum, 2011, 04: 398 - 401.
- [12] 肖彬. 激光测距方法探讨[J]. 地理空间信息, 2010, 04: 162 - 164.
- [13] 刘坤, 陈芳. 激光测距方法及激光器的发展[J]. 科技信息, 2008, 30: 387 - 388.
- [14] 冯仲科, 隋宏大, 邓向瑞, 等. 三角高程法树高测量与精度分析[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29 (2): 31 - 35.
- [15] 隋金雪. 激光测量关键技术及其应用研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2005.
- [16] 刘先卓, 王树奎, 陈锦生, 等. 激光测量技术及其应用[J]. 机械设计与制造, 2003, 3: 95 - 96.