

不同能见度下激光测距仪最大测程的数值算法

郭 豪^{1,2}, 邱 琪¹, 马 娜², 刘艳芳²

- (1. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;
2. 中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 为了定量地评估激光测距仪的最大测程, 并快速掌握激光测距仪在不同能见度下的具体性能, 提出了一种最大测程数值算法, 即通过结合激光测距方程和大气透过率计算公式来构建并求解超越方程的方法, 可完成最大测程的定量计算。在此基础上, 又提出了比例算法来完成不同能见度下最大测程的等效推算。根据算法原理, 分别进行了数值模拟计算, 并给出了最大测程与能见度的关系曲线。数值模拟结果表明, 该方法可以方便准确地完成多种情况下激光测距机最大测程的计算, 具有定量直观、计算精度高、使用方便等优点, 为激光测距仪最大测程的检测与评估提供了一种新方案。

关键词: 数值算法; 激光技术; 最大测程; 测距方程; 能见度

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3330-05

Numerical algorithm for maximum range of laser rangefinder in different visibility

Guo Hao^{1,2}, Qiu Qi¹, Ma Na², Liu Yanfang²

- (1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. Chinese Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: To evaluate the maximum range of laser rangefinder quantificationally, and to get the performance in different visibility rapidly, a new numerical algorithm was put forward. The empirical formula of atmospheric transmissivity was plugged into laser range equation, so a transcendental equation was generated and solved, the maximum range was calculated correspondingly. Based on the numerical algorithm, proportional method was applied to deduce maximum range in different visibility. The numerical simulative calculation of maximum range in different conditions was made by using this theory, and relation curves between maximum range and different visibility ($R_{max}-V$) were drawn to explain the influence of visibility on maximum range visually. The simulation results show that the new numerical algorithm works well in calculating the maximum range of laser rangefinder. It has many virtues, such as quantitative results and high precision, etc. It provides a new approach to evaluate and assess the maximum range of laser rangefinder in lots of different situations.

Key words: numerical algorithm; laser technology; maximum range; range equation; visibility

收稿日期: 2013-04-19; 修订日期: 2013-05-24

基金项目: 总装备部十二五预研项目(510303020403-4)

作者简介: 郭豪(1979-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电系统仿真、测评方面的研究。Email: whatbeam@163.com

0 引言

脉冲激光测距仪的原理和结构比较简单,测程远,功耗小,已在地形测量、工程测量、云层和飞机高度测量、战术前沿测距、对月观测^[1]、卫星测距^[2]等方面得到广泛的应用。

激光测距仪最重要的性能指标之一是最大测程,它受天气条件尤其是大气能见度的影响较大,同一台测距仪在不同能见度条件下的最大测程往往会发生较大的变化。如何准确得到不同能见度下的最大测程,是激光测距仪性能评测中的一个难点。文中旨在提出一种合适的计算方法,来解决当前最大测程检测中难以量化的问题,并能够将某一能见度下的最大测程很方便地换算到所需能见度下的最大测程,从而为全面掌握和定量准确评估激光测距仪的主要性能提供有力支持。

1 常见最大测程检测方法

激光测距仪最大测程常用的检测方法主要有实际测距法和消光比测试法两大类。

1.1 实际测距法

实际测距法是最直观的检测方法,选择合适天气,在指标规定的距离上放置待测的真实目标或替代目标,然后对该目标进行测距,若能达到规定的准确率就认为其测程检验合格。

实际测距法的优点是直接客观,在测距机的验收与鉴定中最常用;不足主要有以下几点:一是对实验条件要求较高,如天气、场地、目标等均需满足规定要求;二是受能见度影响大,同一台测距仪在不同能见度下测得的最大测程可能相差较大,实验重复性差,结果可比性差;三是实验成本高,需要花费大量的时间、人力和物力。

1.2 消光比测试法

消光比测试法是通过在激光测距仪的发射或接收光路中加入激光衰减器,来模拟大气传输及目标距离对激光的消光效果,进而模拟检测激光测距仪最大测程的一种方法。该方法首先为美军所采用,1970年后开始为各国所采用。消光比测试法又分为室外消光法、光纤消光法^[3-4]和消光比与增益系数比检测结合法^[5-6]等。

(1) 室外消光法

室外消光法检测原理如图 1 所示,在距激光测距仪 L (通常取 500m)处立一标准漫反射测试靶,靶面反射系数为 ρ 且靶面积大于发射激光光斑面积,在激光测距机发射光路中加入衰减器,瞄准靶板进行测距,改变衰减器的衰减量,直至测距机达到临界稳定测距状态,此时的衰减量可反映测距机的最大测程。

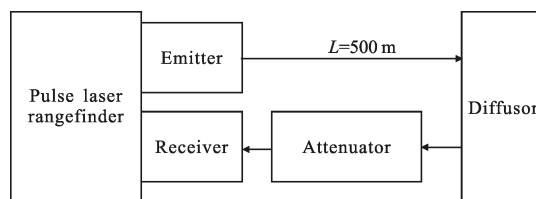


图 1 室外消光比检测原理框图

Fig.1 Functional diagram of extinction ratio test outdoor

室外消光法优点是受外界因素影响小,标准公认,设备简单,操作方便,成本很低。最大的不足在于无法得到定量的最大测程值,因此只适合于批量产品的比对检测,具有一定局限性。

(2) 光纤消光法

光纤角光法原理与室外消光法类似(如图 2 所示),不同的是以激光在光纤中的传输损耗来模拟激光在室外 500 m 大气中的传输损耗。自测距机发射出的激光经衰减片衰减后进入光纤,激光经过光纤传输后,由激光测距机的接收物镜接收。改变衰减片的衰减量,直至测距机接收到的回波次数达到临界稳定测距状态。

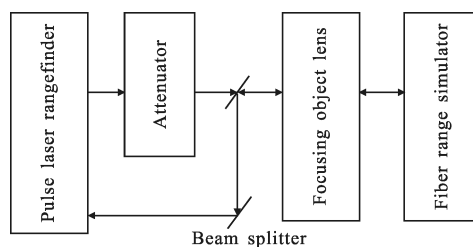


图 2 光纤消光比检测原理框图

Fig.2 Functional diagram of extinction ratio by fiber

光纤消光法可以消除外界气候条件的影响,但仍无法得到定量的最大测程值,且光纤易折断,不便移动,因此在实用中也受到限制。

(3) 消光比与增益系数比检测结合法

其原理为通过实测室外消光比和增益系数比,

代入消光比关系式求解最大测程。消光比关系式为:

$$S_r = 10 \lg \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{R_{\max}^2}{R_2^2} \frac{G(R_2)}{G_{\max} F(A)} \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad (1)$$

式中: ρ_1 为指标规定的实际测距目标的反射率; ρ_2 为消光试验靶的反射率; R_{\max} 为最大测程; R_2 为消光试验时的距离(即 500 m); $G(R_2)$ 为测距仪接收电路在距离 R_2 处的增益; G_{\max} 为接收电路的最大增益; τ_2 为距离 R_2 的大气透过率; τ_1 为距离 R_{\max} 的大气透过率; $F(A)$ 为修正因子。只要求出测距仪在距离 R_2 处的消光比值 S_r , 以及增益系数比 $G(R_2)/G_{\max}$, 可计算出最大测程 R_{\max} 。

结合法最大的优点是能够求出定量的最大测程值, 但测试工作量较大, 需要专门的检测设备, 成本较高, 操作较复杂。

2 数值算法原理

根据辐射度学基本知识, 不难推导出漫反射目标脉冲激光测距方程为:

$$P_r = \frac{4P_e \eta_e \eta_r T_e T_r \rho A_i A_r \cos \alpha}{\pi^2 r_e^2 r_r^2 \theta^2} \quad (2)$$

$$\text{或 } P_r = \frac{P_e \eta_e \eta_r T_e T_r \rho A_i \cos \alpha}{\pi r_r} \quad (3)$$

对于一般的测距仪有 $r_e = r_r = r$, $T_e = T_r = T$, 其测距方程可简化为:

$$r = \sqrt[4]{\frac{4P_e \eta_e \eta_r T^2 \rho A_i A_r \cos \alpha}{\pi^2 \theta^2 P_r}} \quad (4)$$

$$\text{或 } r = \sqrt{\frac{P_e \eta_e \eta_r T^2 \rho A_i \cos \alpha}{\pi P_r}} \quad (5)$$

其中公式(2)和(4)为小目标测距公式; 公式(3)和(5)为大目标测距公式(目标在光束方向上的投影面积小于激光光斑面积之间时称为小目标, 反之称为大目标^[7])。其中: P_r 为激光测距仪收到的回波功率; P_e 为发射功率; η_e 为发射光学系统透过率; η_r 为接收光学系统透过率; T_e 为发射光路上的大气透过率; T_r 为接收光路上的大气透过率; ρ 为反射率; A_i 为目标面积; A_r 为接收光学系统面积; α 为目标表面法线方向与测距光束的夹角; 发射窗口至目标的距离为 r_e ; 接收窗口至目标的距离为 r_r ; θ 为发散角。假设在发散角内辐射强度是均匀的, 且目标表面近似为朗伯平面, 遵守朗伯余弦定律。

对于近红外激光来说, 其衰减主要由气溶胶散

射引起, 工程应用通常以能见度表示气溶胶消光系数^[8], 即

$$\mu = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q \quad (6)$$

当能见度 $V < 6$ km 时, $q = 0.585 V^{1/3}$; 中等能见度 $q = 1.3$, 能见度很大 ($V > 80$ km) 时 $q = 1.6$ 。所以由气溶胶散射导致衰减的透射率公式(水平)可由下式表示:

$$t_r(\lambda) = \exp \left[-\frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^q r \right] \quad (7)$$

在测距方程(2)~(4)中, 根据国军标规定^[9], 当 P_r 取临界稳定测距状态时的回波功率 P_{\min} 时, 其对应的距离 R_{\max} 即为该环境条件下的最大测程。将公式(7)代入公式(4)和(5)可得最大测程计算公式如下(取 $\lambda_0 = 0.55$):

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{4P_e \eta_e \eta_r \rho A_i A_r \cos \alpha}{\pi^2 \theta^2 P_{\min}}} \exp \left[-\frac{3.91}{2V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q R_{\max} \right] \quad (8)$$

或

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_e \eta_e \eta_r \rho A_i \cos \alpha}{\pi P_{\min}}} \exp \left[-\frac{3.91}{V} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q R_{\max} \right] \quad (9)$$

根据应用情况的不同, 不同能见度下的最大测程数值算法又可分为两种: 直接计算法、比例计算法。下面以小目标为例进行讨论。

2.1 直接计算法

当最大测程计算公式中各项参数已知或可测, 可将获得的全部参数输入计算公式和得到如下形式的方程:

$$R_{\max} = a \times \exp(b \times R_{\max}) \quad (10)$$

式中: a 、 b 为常数; R_{\max} 为待求的最大测程, 该方程为一超越方程, 可用迭代法、牛顿切线法等算法进行求解。这种方法的优点是当所需参数已知或易测得时, 可直接定量计算出最大测程, 无需复杂的实验, 制约因素少。通过改变能见度参数, 可计算得到不同能见度下的最大测程。

2.2 比例计算法

适用于在低能见度条件下实测得到了此时的最大测程或回波功率, 需要推算出高能见度条件下最大测程的情形。该方法不需要直接计算法中的很多参数, 仅需要某一能见度下的最大测程或回波功率即可求出其他能见度下的最大测程, 便于使用。

具体分为两种情形:

(1) 已实测得到某一能见度条件下的最大测程,

需要推算出其他指定能见度下的最大测程。

假设能见度 V_1 时, 实测的最大测程为 $R_{\max 1}$, 透过率为 T_1 , 需要推算出能见度为 V_2 时的最大测程 $R_{\max 2}$ 。由最大测程计算公式(8)可得:

$$\frac{R_{\max 1}}{R_{\max 2}} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \Rightarrow R_{\max 2} = \frac{R_{\max 1}}{\sqrt{T_1}} \exp \left[-\frac{3.91}{2V_2} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q R_{\max 2} \right] \quad (11)$$

将参数代入, 求解形如公式(10)的超越方程即可。

(2) 已实测得到某一能见度条件下某距离的目标回波功率, 需要推算出其他指定能见度下的最大测程。

适用于未能(或不易)测到任何能见度条件下最大测程的情况, 此时仅需要测出一定距离处的回波功率。假设能见度 V_1 时, 实测的测距仪接收到的回波功率为 P_1 , 透过率为 T_1 , 需要推算出能见度为 V_2 时的最大测程 $R_{\max 2}$ 。由最大测程计算公式(8)可得:

$$\frac{R_{\max 1}}{R_{\max 2}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\min}}{P_1}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \Rightarrow R_{\max 2} = R_{\max 1} \sqrt[4]{\frac{P_1}{P_{\min} T_1^2}} \cdot \exp \left[-\frac{3.91}{2V_2} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^q R_{\max 2} \right] \quad (12)$$

将参数代入, 求解形如公式(10)的超越方程即可。

3 数值模拟

下面以小目标为例, 利用上述数值算法进行数值模拟计算。

3.1 直接计算法

假设某激光测距仪波长 $\lambda = x_1 \mu\text{m}$, 测得的初始发射功率 $P_e = x_2 \text{ MW}$, 光学系统透过率 $\eta_t = \eta_e = x_3$, 发散角 $\theta = x_4 \text{ mrad}$, 接收光学系统直径 $D = x_5 \text{ m}$, $P_{\min} = x_6 \text{ W}$, 目标反射率为 x_7 , 目标表面积为 $x_8 \text{ m}^2$, 目标表面法线与测距光路夹角为 0° , 能见度 $V = 25 \text{ km}$, $q = 1.3$ 。各项参数输入公式(8), 得到方程为:

$$R_{\max} = 34\ 179 \times \exp(-0.000\ 02 \times R_{\max}) \quad (13)$$

易知该方程有且只有 1 个正根。用迭代法进行求解。可计算出方程的根在 22 005.6~22 005.8 之间, 所以取其根为 22 006 已可以达到所需精度, 即能见度 $V = 25 \text{ km}$ 时, 该测距仪的最大测程为 22 006 m。

3.2 比例推算法

(1) 情形一

假设当能见度 $V_1 = 10 \text{ km}$ 时, 实测的最大测程为

$R_{\max 1} = 15\ 635 \text{ m}$, 透过率为 $T_1 = 0.209\ 4$, 要求推算出 $V_2 = 25 \text{ km}$ 时的最大测程 $R_{\max 2}$ 。将参数代入公式(11), 则超越方程为:

$$R_{\max} = 34\ 167 \times \exp(-0.000\ 02 \times R_{\max}) \quad (14)$$

利用迭代法解之得 $R_{\max 2} = 22\ 000 \text{ m}$ 。

(2) 情形二

假设 $V_1 = 10 \text{ km}$, $R_{\max 1} = 10 \text{ km}$, $T_1 = 0.367\ 7$, 实测的回波功率为 $P_1 = 5.54 \times 10^{-7} \text{ W}$ 。要求推算出 $V_2 = 25 \text{ km}$ 时的最大测程 $R_{\max 2}$ 。将参数代入公式(12), 同样是求解超越方程

$$R_{\max} = 34\ 179 \times \exp(-0.000\ 02 \times R_{\max}) \quad (15)$$

利用牛顿切线法解之得 $R_{\max 2} = 22\ 000 \text{ m}$ 。

3.3 激光测距仪的 $R_{\max} - V$ 曲线

利用文中提出的最大测程数值算法, 可以方便地研究计算不同波长、峰值功率和灵敏度的激光测距仪对不同表面积、反射率的目标在不同能见度条件下的最大测程, 可以定量地分析各个相关参数对最大测程的影响。

图 3 给出的是 $1.06 \mu\text{m}$ 、 $1.54 \mu\text{m}$ 、 $1.57 \mu\text{m}$ 三种波长的测距仪在不同能见度下的最大测程曲线。图 4 给出的是波长为 $1.57 \mu\text{m}$, 峰值功率分别是 10^5 W 、 10^6 W 、 10^7 W 的测距仪在不同能见度下的最大测程曲线。图中每相邻两点的最大测程相差 1 km 。

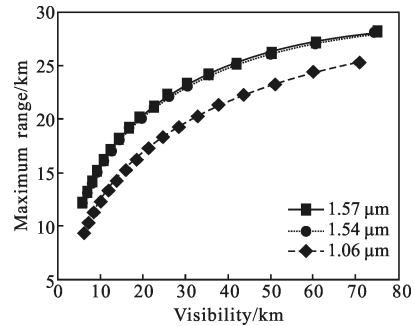


图 3 多种波长测距仪的 $R_{\max} - V$ 曲线

Fig.3 $R_{\max} - V$ curves of multi-wavelength rangefinder

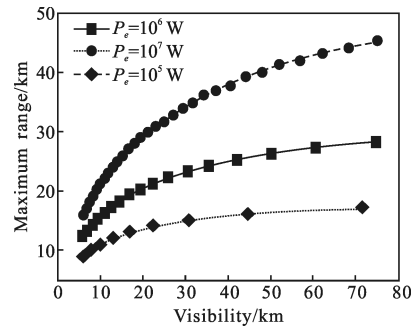


图 4 三种峰值功率测距仪的 $R_{\max} - V$ 曲线

Fig.4 $R_{\max} - V$ curves of three peak power rangefinders

由图可见,在相同条件下:

(1) 随着能见度的增加,同一测距仪的最大测程逐渐呈现一种“饱和效应”,能见度小于 20 km 时对最大测程的影响较大;

(2) 高峰值功率的测距仪在能见度越高时,最大测程的提升越显著;

(3) 波长为 1.57 μm 和 1.54 μm 的测距仪最大测程指标明显优于 1.06 μm 的测距仪。

在斜程测距情况下,利用斜程透过率计算公式,结合文中提出的计算思路,同样可完成斜程测距时不同能见度下最大测程的数值计算,限于篇幅,这里不再列出。

4 结 论

文中提出的激光测距仪最大测程数值算法能够直接定量计算出激光测距仪的最大测程,快速方便地完成不同能见度下最大测程的换算,无需检测消光比和增益系数比,并可对影响最大测程的相关参数如测距仪自身参数、大气参数、目标参数等进行逐一分析,具有结果直观,计算精度高,应用广泛灵活,重复性好,工作量小,成本低等优点,能够为激光测距仪的设计生产、性能检测及实际使用提供重要的技术支持。

参 考 文 献:

- [1] Hua Yang, Huang Chengli. Research progress in lunar laser ranging[J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(3): 378–394. (in Chinese)
华阳, 黄乘利. 月球激光测距观测与研究进展 [J]. 天文学进展, 2012, 30(3): 378–394.
- [2] Han Guangyu, Qu Feng, Guo Jin, et al. Analysis and realization of day-time ranging of SLR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(4): 885–890. (in Chinese)
韩光宇, 瞿锋, 郭劲, 等. 卫星激光测距中白天测距的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 885–890.
- [3] 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*, 2005, 34(6): 664–666. (in Chinese)
曾嫦娥, 王茜蓓, 常岗, 等. 脉冲激光测距机最大测程测试方法研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 664–666.
- [4] Yang Yeping, Yang Zhaojin, Hou Min, et al. Calibration methods for maximum measuring range of pulse laser range finder[J]. *Applied Optics*, 2003, 24(3): 26–27. (in Chinese)
杨冶平, 杨照金, 侯民, 等. 脉冲激光测距机最大测程校准方法[J]. 应用光学, 2003, 24(3): 26–27.
- [5] Wang Qianqian, Zeng Chang'e, Peng Zhong. Integrated test technology for laser range finder [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 1973–1976. (in Chinese)
王茜蓓, 曾嫦娥, 彭中. 脉冲激光测距机性能综合测试技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 1973–1976.
- [6] Han Fuli, Zeng Chang'e, Liang Jun, et al. Method for measuring relative gain curve of pulse laser rangefinder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2413–2417. (in Chinese)
韩福利, 曾嫦娥, 梁君, 等. 脉冲激光测距机相对增益曲线测试方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2413–2417.
- [7] GJB 5145–2002. Analogue test method of maximum range for pulsed laser rangefinders [S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of General Armament Department, 2002. (in Chinese)
GJB 5145–2002. 脉冲激光测距仪最大测程模拟测试方法 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2002.
- [8] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. *Infrared Physics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 186–187. (in Chinese)
张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 186–187.
- [9] GJB 2241A–2008. Performance test method for pulse laser rangefinder[S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of General Armament Department, 2008. (in Chinese)
GJB 2241A–2008. 脉冲激光测距仪性能试验方法 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008.