

文章编号: 0253-2239(2001)01-0075-04

机载激光测距机测距性能的数值仿真

羊毅¹⁾, 陆祖康¹⁾, 胡磊力¹⁾, 邹盛怀²⁾

1), 浙江大学现代光学国家重点实验室, 杭州 310027;
2), 中国航空工业第一集团公司第六一三研究所, 洛阳 471009

摘要: 根据激光测距机对漫反射大目标的测距方程, 从理论上分析了激光测距机的测距性能与大气透过率及背景噪声之间的关系; 并使用 LOWTRAN7 软件, 对它们之间的依赖关系进行了数值计算与深入探讨, 为机载激光测距机的测程指标的设计及测试提供了依据。

关键词: 激光测距机; 测距性能; 大气透过率; 背景噪声

中图分类号: TN249; V248.1 文献标识码: A

1 引 言

测程是设计和制造军用激光测距机的重要战术硬指标, 但在实际应用中发现测程是受目标特性、大气特性及背景噪声特性影响极大的软指标^[1]。本文对不同能见度条件下, 两种典型路径的大气特性及背景光辐射特性对激光测距机测距性能的影响进行了全面的理论分析、数值模拟与比较, 所得结论为测程指标的拟定及测试提供了理论依据。

2 激光测距机的测距性能

脉冲回波式激光测距机的测距性能, 通常用在一定距离上激光收发系统能够探测到的目标反射激光脉冲的概率表示, 并称之为测距概率。测距概率与测距范围有关, 给定要求达到的概率, 可探测距离越远越好; 反之, 给定待测距离, 测距概率越高越好。

2.1 激光测距方程

当激光测距机的接收视场角大于发射光束发散角时, 激光测距机对漫反射大目标的测距方程可用(1)式来表示

$$P_r = \frac{P_t T_t T_a^2 T_r A_r \rho \cos \varphi}{\pi R^2}, \quad (1)$$

式中, P_t 为激光测距机的发射峰值功率, P_r 为激光测距机的接收峰值功率, T_t 为发射光学系统的透过率, T_r 为接收光学系统的透过率, A_r 为接收孔径面积, ρ 为目标漫反射系数, φ 为目标表面法线与发射光束之间的夹角, T_a 为大气或其他介质的单程透

率, R 为目标距离。

由(1)式可知, 随着目标距离 R 的增大, 测距机接收到的目标回波功率迅速减小。当 $R = R_{\max}$ 时, 测距机接收到的回波功率 P_r 达到最小可探测功率 $P_{r\min}$, 即

$$\frac{P_t T_t}{P_{r\min} / (T_r A_r)} = \frac{\pi R_{\max}^2}{T_a^2 \rho \cos \varphi}, \quad (2)$$

(2)式左边分子部分表示由发射光学系统输出的激光脉冲的峰值功率, 分母表示进入接收视场中的光束在接收光学系统单位面积上的最小可探测功率。在外部条件相同的情况下, 两者之比越大, 则激光测距机的测程越远。

2.2 最小可探测功率

最小可探测功率 $P_{r\min}$ 定义为, 满足测距概率要求的最小信噪比 SNR_{\min} 所对应的探测功率。由于激光测距机大多在白天工作, 因此典型的情况是自然背景光源为主要噪声源。对于硅雪崩光电二极管 (APD 管) 有

$$\text{SNR}_{\min} = \frac{I_{s\min}}{I_n} = \frac{P_{r\min} \eta e / (h\nu)}{[2e^2 B F_m P_b \eta / (h\nu)]^{1/2}}, \quad (3)$$

式中, $I_{s\min}$ 为满足最小信噪比要求的最小信号峰值电流, I_n 为噪声电流 i_n 的均方根值, η 为探测器的量子效率, e 为电子电荷, h 为普朗克常数, ν 为光波频率, B 为接收系统带宽, F_m 为与光电倍增过程相关的噪声系数, P_b 为探测器接收的背景噪声功率, 它可由(4)式计算得出:

$$P_b = T_r \Omega_r A_r E_b \Delta \lambda, \quad (4)$$

式中, Ω_r 为接收视场角, E_b 为背景光源的光谱辐射度, $\Delta \lambda$ 为窄带滤光片带宽。

2.3 虚警率

平均虚警概率 $\overline{\text{FAR}}$ 是每秒钟输出噪声电流 i_n 超过探测器阈值电流 I_t 的平均次数, 它由 Rice 给出^[2]:

$$\overline{\text{FAR}} = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau} \exp\left[-\frac{I_t^2}{2I_n^2}\right], \quad (5)$$

式中, τ 为输入脉冲宽度, I_n 为噪声电流 i_n 的均方根值。

2.4 测距概率

目标的测距概率 P_d 本质上是峰值信号电流 I_s 加噪声电流 i_n 超过阈值电流 I_t 的概率, 即

$$P_d(I_s + i_n > I_t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}I_n} \int_{I_t - I_s}^{\infty} \exp\left[-\frac{i_n^2}{2I_n^2}\right] di_n \approx \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left[\frac{I_s - I_t}{\sqrt{2}I_n}\right] \right], \quad (6)$$

式中, $\operatorname{erf}(\dots)$ 为标准误差函数。

由(1)式~(6)式^[2]可知, 激光测距机的最大测程是测距机特性、目标特性、大气特性、背景噪声特性的多变量函数。因此, 对激光测距机测程的拟定与测试, 必须是在一定的外界约束条件下进行的。离开外界约束条件及测距概率, 测程的设计与测试便毫无实际意义。

3 1.064 μm 激光的大气传输及背景光的辐射特性

3.1 理论模型

1.064 μm 激光的大气衰减主要是大气气溶胶的吸收和散射^[3]。气溶胶的特征取决于气溶胶粒子的尺度分布、复折射指数和浓度及其高度分布等物理特性。由于这些特性具有明显的时空变化, 并且难于现场测量, 因而通常的做法是依据一些观测结果总结成一定的模型。目前较常用的模型是 LOWTRAN7 模型。在 LOWTRAN7 中, 与地面有关的模型有乡村气溶胶、城市气溶胶、海洋气溶胶和沙漠气溶胶 4 种; 与上层大气有关的则有对流层、平流层、高层大气等气溶胶模型。在这些模型中考虑了相对湿度和季节的变化, 还考虑了风速的影响, 并能计算相应模型中太阳光与月光的光谱辐射亮度。

3.2 数值计算

我们使用了 LOWTRAN7 程序, 对中纬度夏天标准大气模型及城市气溶胶模型进行了大气透过率及太阳光谱辐射亮度计算。

1) 在不同能见度下, 计算了 1.064 μm 激光沿地面水平路径及初始高度 $H_1 = 500 \text{ m}$ 、终止高度 $H_2 = 0$ 的斜路径传输不同距离后大气透过率 T_a , 结果示于图 1。由图中曲线可知, 当能见度为 15 km 和 9 km 时, 两种路径的大气透过率基本相等。

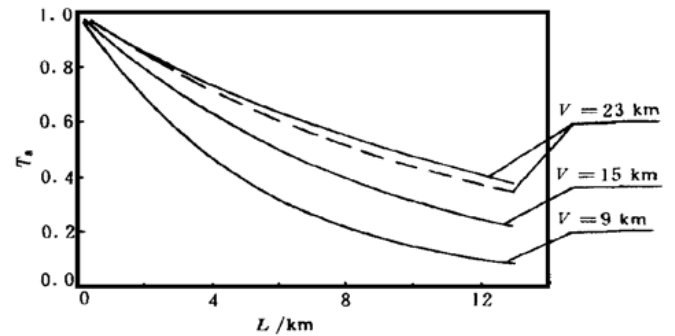


Fig. 1 Atmospheric transmittance T_a with the path length L . Solid line: slant path, dash line: horizon path

2) 在太阳天顶角为 60° 条件下, 计算了不同能见度时不同路径长度的地面水平路径及初始高度 $H_1 = 500 \text{ m}$ 、终止高度 $H_2 = 0$ 的斜路径上太阳光在中心波长 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$ 、波长范围 $\Delta\lambda = 0.01 \mu\text{m}$ 处的辐射亮度 $R = E_b \Delta\lambda$, 计算结果示于图 2 和图 3。计算出的到达激光测距机接收器的总光谱辐

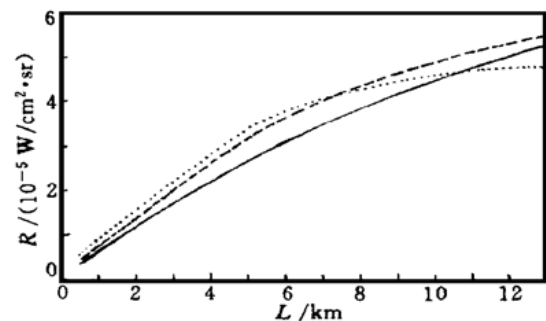


Fig. 2 Solar radiance R with the path length L in horizon path. —: $V = 23 \text{ km}$; ----: $V = 15 \text{ km}$;: $V = 9 \text{ km}$

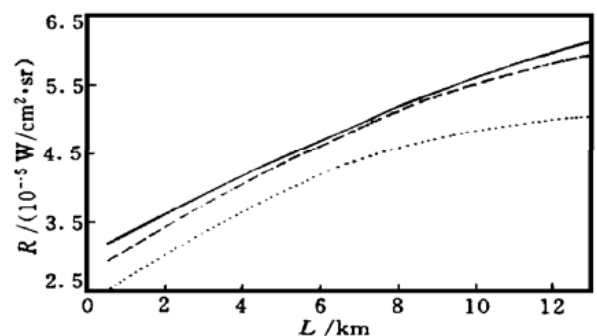


Fig. 3 Solar radiance R with the path length L in slant path for $H_1 = 500 \text{ m}$ and $H_2 = 0$. —: $V = 23 \text{ km}$; ----: $V = 15 \text{ km}$;: $V = 9 \text{ km}$

射亮度 E_b , 包括三类辐射^[4]: 大气辐射, 即由大气或边界产生的所有热辐射; 由路径上的大气散射的太阳辐射; 地面反射的太阳辐射。

4 YAG 激光测距机测距性能的数值计算

4.1 YAG 激光测距机的结构参数

某机载激光测距机具有以下结构参数: 激光发射功率 $P_t = 2 \times 10^6$ W, 发射天线的透过率 $T_t = 0.9$; 接收天线的透过率 $T_r = 0.48$; 接收天线口径 $D_r = 38$ mm; 窄带滤光片带宽 $\Delta\lambda = 10$ nm; 接收天线视场角 $\Omega_r = 1.256 \times 10^{-5}$ sr; 接收系统带宽 $B = 15$ MHz; 集成前放 APD 管的量子效率 $\eta = 40\%$; 集成前放 APD 管的内部增益 $M = 1000$, 则与光电倍增过程相关的噪声系数为^[2]

$$F_m = M \{1 - 0.8[(M - 1)/M]^2\} = 201.6.$$

4.2 激光测距机的设计约束条件

机载激光测距机的整机调试, 如探测阈值电流 I_t 的设置, 通常是通过对测程范围内的近、中、远三个典型目标进行地面测距来完成的, 因此测程的设计约束条件常常是对地面测距而言的。设此约束条件为: 在 15 km 能见度条件下, 当虚警率小于等于 1%、测距概率大于等于 99% 时, 对漫反射系数 $\rho = 0.15$ 的地面大目标测距范围为 200 m ~ 10000 m。上面所述激光测距机的结构参数就是根据该测程设计约束条件设计的。

由于激光测距机一般采用将放大和滤波的信号幅度和所置的阈值相比较的方法来探测信号脉冲的, 因此要对激光测距机的测距性能进行数值计算必须首先确定所置阈值的大小, 而阈值的大小则是根据限制噪声引起虚警率的要求而设置的。设集成前放 APD 管输出的目标回波信号电脉冲的脉宽 $\tau = 50$ ns, 由(5)式可算出满足 FAR = 1% 的阈值信噪比 $TNR \equiv I_t/I_n = 6.352$ 。由图 2 知, 15 km 能见度下为使 200 m ~ 10000 m 测程内虚警率均满足设计要求, I_t 应以 $E_b \cdot \Delta\lambda = 5.642 \times 10^{-5}$ W/(cm²·sr) 为噪声约束条件。

4.3 YAG 激光测距机测距性能的数值计算及结果分析

根据测程的设计约束条件, 将图 1~ 图 3 的有关数据及测距机的结构参数代入(2)式~ (6)式, 便可对激光测距机的测距性能进行数值仿真。

1) 计算出的对漫反射系数 $\rho = 0.5$ 的地面大目标进行地面水平测距及机载对地测距的数值仿真

试验结果示于表 1。

在晴朗(能见度 V 为: $12 \text{ km} < V < 18 \text{ km}$) 的天气条件下, 我们选择了由郑州计量学院标定过的典型状态目标, 对上述 YAG 激光测距机进行了地面实际测距试验。该激光测距机在地面实际测距中所达到的主要技术指标为: 最大测程大于等于 10 km, 最小测程小于等于 115 m, 测距精度为 ± 5 m, 测距概率大于等于 99%。在对距离为 590 m、4455 m、9905 m 的水泥建筑物 ($\rho = 0.5$) 及对空进行连续测距的过程中, 正确测距的概率达到 100%, 与表 1 计算结果相符。这说明我们的计算模型是正确的, 同时也说明以地面测距的测程约束条件为设计、测试依据可以满足机载测距性能的要求。

Table 1 The numerical result in range finding

FAR	Visibility	Horizon path at ground		
		18 km	15 km	12 km
Target distance				
	590 m	< 1%	< 1%	< 1%
	4455 m	< 1%	< 1%	< 1%
	9905 m	< 1%	< 1%	< 1%
	∞	< 1%	< 1%	< 1%
FAR	Visibility	Slant path for $H_1 = 500$ m and $H_2 = 0$		
		18 km	15 km	12 km
Target distance				
	590 m	< 1%	< 1%	< 1%
	4455 m	< 1%	< 1%	< 1%
	9905 m	< 1%	< 1%	< 1%
	∞	< 1%	< 1%	< 1%

2) 计算了不同能见度条件下, 对 $\rho = 0.15$ 的地面大目标进行测距时, 测距概率为 99% 的地面测距及机载测距的最小可探测功率 P_{\min} 、虚警率 FAR 及最大测程 R_{\max} , 计算结果分别示于表 2 和表 3。

Table 2 The ranging performance for the laser range finder in horizon path at ground

Ranging performance	Visibility	23 km	19 km	15 km	11 km	9 km
		$P_{\min} / 10^{-8}$ W	3.755	3.753	3.749	3.742
FAR / %		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
R_{\max} / km		13.1	11.9	10.4	8.7	7.7

由表 2 及表 3 可以看出: 激光测距机的最小可探测功率随背景噪声的增大而增大, 且机载测距时的最小可探测功率的变化幅度大于地面测距时的变

化幅度,这是由于机载测距路径上的背景光强度变化较大(见图2、图3)所致。另外,激光测距机的最大测程不仅与测距路径上的大气透过率密切相关,而且还取决于测距路径上的背景光强度。例如在23 km 能见度条件下,地面测距的最大测程略大于机载测距的最大测程,就是测距路径上的大气透过率和背景噪声共同作用的结果。

Table 3 The ranging performance for the laser range finder in slant path for $H_1 = 500$ m and $H_2 = 0$

Visibility \ Ranging performance	23 km	19 km	15 km	11 km	9 km
$P_{\min} / 10^{-8}$ W	3.846	3.827	3.797	3.741	3.697
FAR/ %	5	2.5	< 1	< 1	< 1
$R_{\max} /$ km	13	11.8	10.4	8.8	7.8

Note H_1 : initial altitude; H_2 : final altitude, the same as in Fig. 1, Fig. 2 and Table 1.

结束语 目前机载激光测距机测程的设计一般均以

地面能见度为约束条件,而在同一大气约束条件下,因测距路径不同,同一激光测距机的测距性能亦有差异,而且这种差异随着载机飞行高度的升高而增大。由于机载空对地激光测距机在装机前,通常要在地面进行整机调试及测距试验,因此在测程设计及地面测距试验中一定要考虑地面测距与机载测距的测距性能差异,以优化激光测距机的整机性能。

参 考 文 献

- [1] Fang Qiwan, Rao Jionghui, Ying Zhixiang. New determination equation for visibility. *Proc. SPIE*, 1996, **2889**: 292~ 293
- [2] 张承铨,刘松明,彭长华等. 国外军用激光仪器手册. 北京: 兵器工业出版社, 1989. 5~ 41
- [3] 金国藩,李景镇,陈家璧等. 激光测量学. 北京: 科学出版社, 1998. 730~ 735
- [4] Isaacs R G, Wang W C, Worsham R D *et al.*. Multiple scattering treatment for use in the LOWTRAN and FASCODE models. *AFGL-TR-86-0073, AD A 173990*

Numerical Simulation of Ranging Performance for an Airborne Laser Range Finder

Yang Yi Lu Zukang Hu Leili

(National Key Laboratory of Modern Optics, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Zou Shenghuai

(The 613th Research Institute of Aviation Industries Group Corporation I of China, Luoyang 471009)

(Received 18 August 1999; revised 29 October 1999)

Abstract: The dependence of ranging performance for an airborne laser range finder on atmospheric transmittance and background noise is theoretically analyzed in accordance with the range equation for the diffuse reflecting target. Based on LOWTRAN7 code, the dependent relationship between them is numerically calculated and discussed. The numerical result can be used as the basis for design and test of the range index for an airborne laser range finder.

Key words: laser range finder; ranging performance; atmospheric transmittance; background noise