

激光测距机在大气中的测程问题

宋 正 方

(中国科学院安徽光机所)

On the measurement range of laser rangefinders in atmosphere

Song Zenfang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

The specific effects of atmospheric attenuation and turbulence expansion are studied on the basis of ranging equation. The results show that atmospheric attenuation has very serious influences and the effects of turbulence expansion on the rangefinder with a cooperative target can not be neglected. The prospects for CO₂ laser rangefinder are discussed.

一 前 言

激光测距机已成为激光大气应用工程中
使用范围最广泛、发展最成熟的一门新技术。
然而，实践表明同样的测距机在不同天气条
件和不同地区的效果大不相同。例如，晴好
天气条件下可以测到 20~30 公里的测距机
在能见度较差时只能测到几公里；在西南高
原地区能可靠地测 30 公里的测距机到了潮
湿的辽东半岛最远的工作距离减为 13 公里
左右。如此大的地区差别究其原因也是大气
条件不同的缘故。因此研究激光测距机的测
程与大气条件之间的关系对选择适当的设计
参数和应用范围是有实际意义的。

影响测距机工作能力的大气因素有下述
两个方面：一是大气衰减，这是指大气中存
在的各种分子和气溶胶粒子(烟、尘、霾、雾等)
对激光能量的吸收与散射所造成的衰减；二
是大气湍流引起的光强的减弱，这是由于光

束在湍流扰动下加宽的缘故。本文将讨论这
两个因素，着重研究中小型测距机的问题。

二、测 距 方 程

我们将从测距机方程出发来讨论大气因
子的影响。假设激光器发射的功率为 P_t ，照
射在反射率为 ρ 而面积大于光束的漫射目标
上，目标与测距机的距离为 D ，测距机的有效
接收面积为 A_r ，如果忽略光学系统在发射与
接收时对光的衰减，则接收到的信号功率是：

$$P = \frac{P_t A_r \rho}{2\pi D^2} K_A \quad (1)$$

其中 K_A 为大气透过率。公式 (1) 是最简单
的漫射大目标的测距方程，据此可以定义测
距机的测程(最大工作距离)为：

$$D_{\max} = \left[\frac{1}{2\pi} \frac{P_t}{P_{\min}} A_r \rho K_A \right]^{1/2} \quad (2)$$

这里 P_{\min} 是在一定信噪比条件下的最小可

收稿日期：1978 年 10 月 23 日。

测信号功率。一般情况下,对于某个测距机说来, P_t 、 P_{min} 和 A_r 这三个参数是给定的。于是,影响测程的外来因素便是目标的反射率和大气透过率。关于后者我们将在下面讨论,这里先简单提一下反射率问题。

目标的反射率与其表面形状、粗糙程度以及物质结构诸因素有关。表1列出了若干自然目标的反射率,供参考^[1]。人造目标的反射率也不能一概而论,有待实验测定。一般以 $\rho=0.1$ 作为设计的参数。

表1 自然目标的反射率($\lambda=0.7$ 微米)

名称	ρ	名称	ρ
干棕土	0.18	青草	0.14
湿棕土	0.15	干草	0.26
干红土	0.29	针叶林	0.03~0.13
湿红土	0.18	落叶林	0.16~0.30
干黄土	0.54	新雪	0.70
湿黄土	0.39	融化的雪	0.65
干沙土	0.43	沙砾	0.26
湿沙土	0.32	平滑混凝土	0.45
石灰石、粘土	0.71	粗糙混凝土	0.36

三、大气衰减

大气透过率通常用下述朗伯定律来计算:

$$K_A = \frac{P}{P_0} = e^{-2\beta D} \quad (3)$$

其中 P_0 是无衰减的信号功率, β 是均匀光程上的大气衰减系数, 2 倍是因为光束在距离 D 上作往返传输。各种激光有不同的 β 值, 这是因为大气分子和气溶胶粒子的吸收与散射同波长紧密有关。大体说来, 在波长较短的可见光和近红外区, 分子或气溶胶散射起主要作用, 而在中红外区的某些波长上分子的吸收占主导地位。对各个地区各种气候条件下统计出具体而详尽的衰减系数是件繁重而困难的任务, 何况实际情况是复杂多变的。为了方便起见, 工程上往往把衰减系数 β 与最直观、最简单的大气参数——能见距离 V

相联系, 在一定误差范围内使用下列经验公式用 V 来估算 β :

$$\beta = \frac{\alpha}{V} \quad (4)$$

这里 V 以公里计, β 的单位是公里⁻¹或分贝/公里。一般地区常用激光的 α 值见表2所示。表中 0.6943 微米波长上的值取自文献[2], 其余均为我们的实验平均值。10.6 微米的 α 值之所以如此分散, 本质的原因是它的衰减因子主要是水汽和 CO₂ 的吸收, 所以使用式(4)估算衰减系数实际上没有多大意义。但一般说来, 晴好天气条件下 CO₂ 激光的衰减较 1.06 微米为大, 而在能见度较差的霾雾中由于散射损失很小, 10.6 微米激光的衰减要比其它波长小得多。例如在能见度为 500 米的雾中, 我们测得 10.6 微米的衰减比 1.06 微米约小一个数量级。其它波长的 α 值实际上也存在 $\pm(10\sim 20)\%$ 的误差, 而在特殊地区(沙漠、海洋和高原等)可能出现更大的偏差。出现偏差的原因主要是上面已经提到的大气成分的复杂多变, 不同地区不同季节的大气成分的特征差异很大。理论计算表明^[3]: 1.06 微米激光在海洋性气溶胶中与能见度的关系较为稳定, 而对大陆性气溶胶则稳定性较差; 10.6 微米激光在同一能见度下完全可以出现有近数量级的变化。某些波长上(例如 0.6943 微米)尽管可以用能见度对衰减系数作出有效的估计, 但由于能见度本身难以正确估计也可能导致不同程度的误差, 因此文中所给的公式(4)和 α 值应当有条件地使用。

表2 常用激光的 α 值

波长(微米)	0.6328	0.6943	0.91	1.06	10.6
α (分贝)	14	12.6	18	10	15(± 10)

为了清楚地看出各个波长上的传输特性, 我们计算了除 10.6 微米以外的四种常用激光在 $V=10$ 公里的条件下往返传输时大气透过率与传输距离的关系, 结果见图1。由

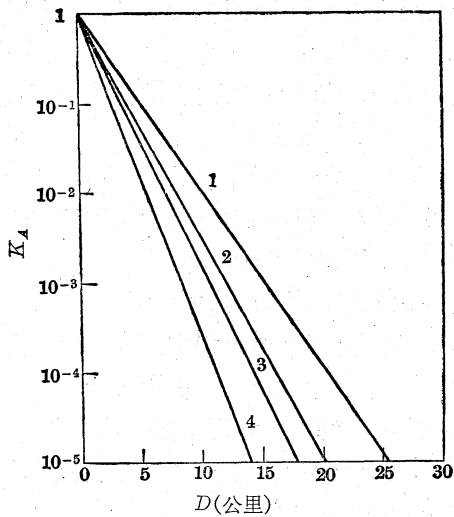


图1 常用激光往返传输时
大气透过率与距离的关系

曲线1—1.06微米；2—0.6943微米；3—0.6328
微米；4—0.91微米($V=10$ 公里)

此可以看出，当 $D=15$ 公里时，1.06 微米和 0.91 微米的透过率相差 100 多倍。

现在我们来考察一下大气衰减对测距的具体影响。作为例子，图 2 示出了 1.06 微米波长(这是与能见度关系较密切的一个波长)在 5 种能见度条件下不同距离上的信号功率。左边的纵坐标是归一化因子 $\eta = P / 2P_t d_r^2 \rho$ ，式中 d_r 为接收孔径，右边则是当

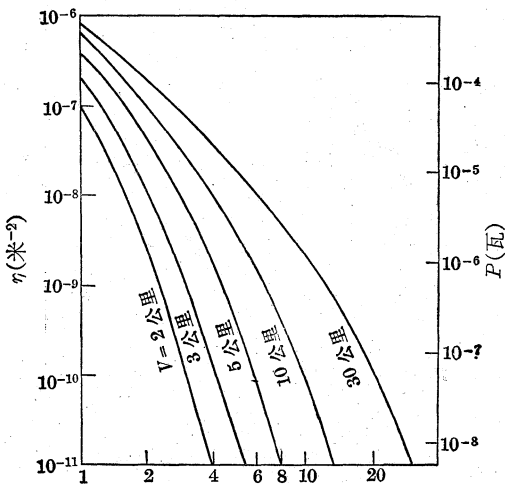


图2 水平大气衰减对测程的
影响($\lambda=1.06$ 微米)

$P_t=4$ 兆瓦， $d_r=6$ 厘米， $\rho=0.1$ 时的接收功率 P 。图上明显地指出，大气衰减对测程的影响是相当严重的。若 $P_{\min}=4 \times 10^{-7}$ 瓦，在 $V=30$ 公里时， $D_{\max}=10$ 公里；当 $V=5$ 公里时测程就降为 4 公里左右。如果在 $V=30$ 公里时要求对 $\rho=0.1$ 的目标的测程达到 30 公里，则发射功率需要增大 2 个数量级，或者把接收灵敏度提高 2 个数量级。这样的要求虽然不是完全作不到的，但显然是非常困难的。因此以漫射体为目标的中小型固体激光测距机的工作距离一般限制在 10~15 公里以内。

上面讨论的是均匀光程亦即水平光程上的情况，对于空中目标测距，情况将复杂得多。这时公式(3)应改为

$$K_A = \exp \left[-2 \csc \varphi \int_0^h \beta(h) dh \right] \quad (5)$$

式中 φ 是仰角， h 是目标的垂直高度，当 h 不太大 φ 不太小时上式是合适的。由于大气中分子和气溶胶的浓度一般随高度的增加而减小，因此与同距离的地面水平传输比较起来，沿倾斜光程传输的衰减要小得多。现以 1.06 微米激光为例讨论斜程上的衰减。

图 3 是根据等效水平距离的概念计算的，在 $V=5、20$ 公里时不同仰角情况下 η (或前述的 P) 与 D 的关系。我们还统计了这两种情况下不同接收灵敏度和仰角时的测程，结果已列于表 3。图 3 和表 3 的结果指出，增大仰角可以大大增加测程，尤其在能见

表3 不同仰角下的测程(公里)

V (公里)	P_{\min} (瓦)	φ				
		0°	10°	20°	40°	90°
5	3.6×10^{-7}	3.8	4.5	5.8	9.1	12
	1×10^{-7}	4.7	6.2	8.8	17	23
	1×10^{-8}	6.8	10.2	24	54	74
20	3.6×10^{-7}	8.5	11.3	15	18	19
	1×10^{-7}	12	19.1	28	34	37
	1×10^{-8}	18	58	88	107	116

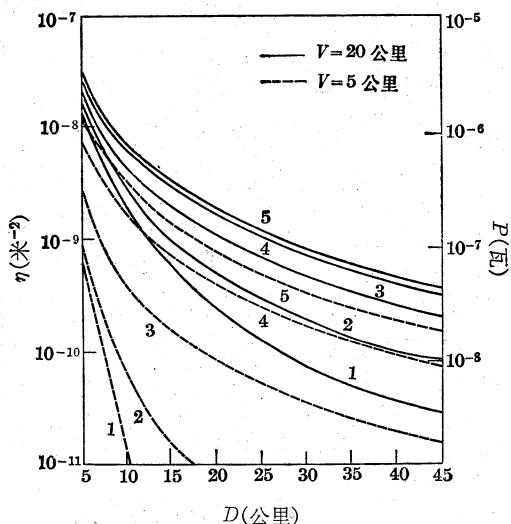


图3 斜程大气衰减对测程的影响($\lambda=1.06$ 微米)

1—5°; 2—10°; 3—20°; 4—40°; 5—90°

度较好、接收灵敏度较高时增加得更显著。

四、大气湍流

大气湍流就光的传播意义而言即为折射率在时空域上的随机起伏，它可以使光束的参数——强度、相位、传播速度以及方向等等引起相应的随机变化，从而产生闪烁、扩展、到达角起伏、光束抖动等等湍流效应。这些效应几乎是同时存在的，只在不同的光束形状、不同的湍流尺度下各有强弱，对不同的应用目的有各自的主要影响而已。直接检测的测距机可以不关心相位起伏问题。虽然闪烁和光束抖动使测距概率有变化，到达角起伏有碍于目标的瞄准和跟踪，但在大多数情况下是不重要的。然而湍流引起的光束发散，也即扩展所造成的平均信号功率的减弱，是使用合作目标测距工作的需要注意的问题。

我们知道，合作目标的测距方程是

$$P = \frac{16}{\pi^2} \frac{P_t A_T A_r}{\theta_t^2 \theta_r^2 D^4} K_A \quad (6)$$

其中 θ_t 和 θ_r 分别是发射光束和合作目标的发散角， A_T 是合作目标的有效面积。在使用

气体激光的相位测距机中，一般情况下 $\theta_t \approx 20''$ ， $\theta_r \approx 2''$ 。

有限光束在均匀大气中的湍流扩展角 θ 可以近似地用下式来计算^[4]：

$$\theta = 4C_n^{6/5} \lambda^{-1/5} D^{3/5} \quad (7)$$

这里 C_n 称为折射率结构常数，是湍流强弱的一个量度，以米^{-1/3}作单位。为了方便起见，可以把湍流强度分为强、中、弱三个等级。根据我们的观测，近地面相应的 C_n 值大致是 10^{-6} 、 10^{-7} 、 10^{-8} 米^{-1/3}。前者大概出现在夏秋晴天中午前后(10~15时)，后者相当于6~8时和16~18时湍流日变化转折的期间，其余时间为中等湍流。

为了对湍流扩展有一个量的概念，我们按照(7)式对 $\lambda=0.6328$ 微米的激光计算了在1~40公里范围内中等、较强和强湍流情况下的扩展角 θ ，如图4所示。计算结果表明湍流扩展是很大的。在中等湍流情况下，在 $D=1$ 公里时湍流扩展角即与发射光束的 θ_t 相当，而到了30公里处 θ 竟达到 θ_t 的7倍。

湍流扩展对信号的减弱可以通过我们定义的湍流透过率 K_T 来计算。 K_T 的定义是：

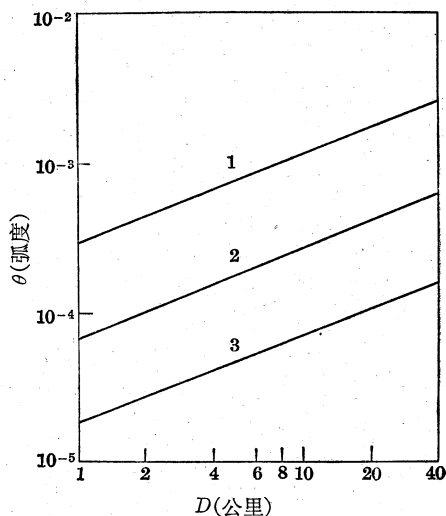


图4 三种湍流情况下的扩展角($\lambda=0.6328$ 微米)

1— $C_n=10^{-6}$ 米^{-1/3}; 2— $C_n=3 \times 10^{-7}$ 米^{-1/3};
3— $C_n=10^{-7}$ 米^{-1/3}

$$K_T = \frac{P'}{P} \quad (8)$$

即等于在湍流扩展时的信号功率 P' 与没有湍流时的信号功率 P 的比值。考虑到存在湍流扩展时光束发散角应为 θ_i (或 θ_T) 与 θ 的均方根值 (已忽略光束衍射极限角), 所以

$$K_T = \left[\left(1 + \frac{\theta^2}{\theta_i^2} \right) \left(1 + \frac{\theta^2}{\theta_T^2} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

图 5 画出了上述三种湍流强度下的 K_T , 其中取 $\theta_i = 20''$, $\theta_T = 2''$ 。该图说明湍流扩展的严重性不亚于大气衰减。也就是说, 能见度很好的晴朗天气, 虽然大气衰减不大, 然而湍流较强, 也有可能达不到预计的测程。

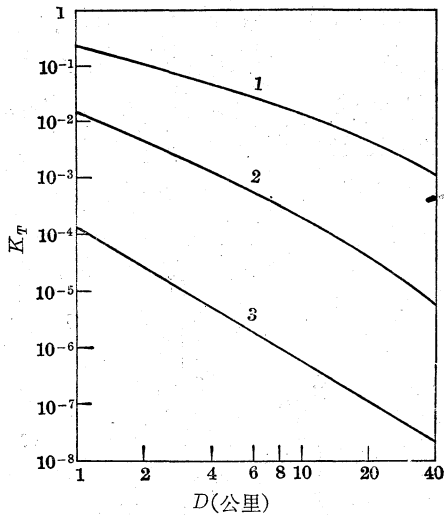


图 5 湍流扩展对光强的衰减
($\lambda = 0.6328$ 微米)

1— $C_n = 10^{-7}$ 米 $^{-1/3}$; 2— $C_n = 3 \times 10^{-7}$ 米 $^{-1/3}$;
3— $C_n = 10^{-6}$ 米 $^{-1/3}$

上面谈了地面湍流的影响。对于倾斜光程我们必须知道 C_n 随高度分布的规律。由于某些原因, 目前尚无完整的理论和实验结

果。就已有的数据来看, 我们不妨用下面的经验公式来估计一定高度上湍流比较强烈时的 C_n 值:

$$C_n(h) = 10^{-6} h^{-1/3} e^{-h/8000} \quad (10)$$

其中 h 以米计算。按照 (10) 式可知, 当 $h = 15$ 米时, $C_n \approx 4 \times 10^{-7}$ 米 $^{-1/3}$, 即地面是强湍流情况下, 这个高度上的湍流已不那么强烈了, 对信号功率的影响无疑小多了。至于湍流所造成的倾斜光程上的扩展, 理论计算表明, 与地面相同距离上的扩展相比要小几倍以至 1~2 个数量级。因此不拟在这里详细讨论。但值得指出, 在空一地光程上从离地面 2 公里起光源的高度越高扩展角越小, 而在地一空光程上则相反。所以对于使用合作目标的测距工作来说, 从地面测量空中目标较之相反的测量有利得多。

五、讨 论

大气衰减和大气湍流对测程的影响, 限制测距机充分发挥潜力, 但这两个因素不是同时起作用的, 因此一架理想的测距机应当选用这样的波长: 晴朗天气下湍流扩展最小, 坏天气时大气衰减最小。目前符合这种条件的又适宜测距应用的激光就是 10.6 微米 CO_2 激光。因为湍流扩展与波长的 1/5 次方成反比, 10.6 微米是常用激光中最长的波长, 受湍流的影响当然最小。

参 考 文 献

- [1] F. T. Arecchi *et al.*; "Laser Handbook" Vol. II, NorthHolland, Amsterdam, 1972.
- [2] P. W. Kruse *et al.*; "Elements of Infrared Technology", Wiley, New York, 1962.
- [3] 吕达仁, 魏重, 《大气科学》, 1978 年第 2 期, 145.
- [4] H. T. Yura; *Appl. Opt.*, 1971, 10, 2771.