

# 脉冲激光测距仪灵敏度与消光比研究

谭显裕

(华中精密仪器研究所 湖北枝城 443304)

**摘要** 本文直接采用模拟测距的消光比测试方法来检测脉冲激光测距仪的灵敏度,可以有效地排除远距离测距中气象差异的影响和地形条件的限制。通过对测试数据的分析与测距能力相比较表明,本文提出的检测方法是有效的。

**关键词** 脉冲激光测距仪,灵敏度,消光比,检测

## 1 引言

脉冲激光测距仪的灵敏度是指仪器系统内部的探测灵敏度,它主要由激光发射功率、接收功率以及发射、接收、瞄准三轴平行度决定,与外部参数无关。而测距仪的测距能力往往受气象差异的影响和地形条件的限制。同一测距仪在不同能见距离条件下的测距能力差别很大,即使是同时同地测量也无确切标准。为了消除这些影响和限制,准确计算、分析和检测仪器的灵敏度是一项重要课题。

本文采用模拟测距的消光比测试方法来直接检测脉冲激光测距仪的灵敏度,可以有效地排除远距离测距中受气象差异的影响和地形条件的限制。

## 2 有关物理概念和理论计算

### 2.1 有关物理概念

脉冲激光测距仪由激光发射器、接收器和激光电源组成。激光发射器包括Q开关(或电光开关)、脉冲激光器和发射、瞄准光学系统以及取样器;接收器包括接收光学系统、光电探测器和视频放大器以及计数、显示器;激光电源包括高压、中压和低压电源。其结构框图示于图1。

仪器的发射、接收和瞄准三光轴平行度由整体设计、工艺和光学系统的调校保证,平行精度在0.2mrad以内。因此,脉冲激光测距仪的探测灵敏度主要由激光发射器的发射功率和接收器的探测功率决定。

**2.1.1 激光发射器的发射功率** 激光振荡器受电激发后产生振荡,发射脉冲光束。光束的功率较小、脉宽窄、前沿陡和发散角小。经放大后成为与入射光束同频率、同方向、

1993-05-31收到,1994-10-24定稿

谭显裕 男,1944年生,高级工程师,现从事激光测距仪的研究工作。

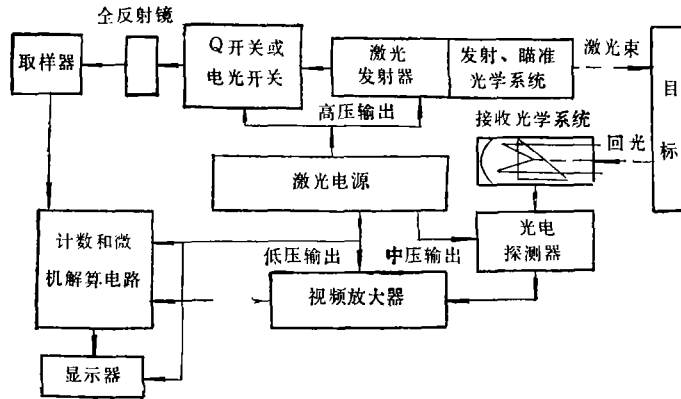


图1 脉冲激光测距仪结构框图

同偏振的激光脉冲输出。再经  $Q$  开关(或电光开关)将脉冲峰值功率提高到“数兆瓦”级,由光学系统发射出去<sup>[1]</sup>。

激光经光学系统对目标发射后,到达  $L$  处目标面上的功率为<sup>[1]</sup>

$$P = P_e K_r \exp[-\alpha L], \quad (1)$$

式中  $L$  为激光到目标面上的距离;  $\alpha$  为大气衰减系数,随距离  $L$  和气象差异变化;  $P_e$  为激光经发射光学系统后的发射功率;  $K_r$  为光学系统的透射率。

**2.1.2 接收器的探测功率** 接收光学系统接收从目标返回的激光信号后,由光电探测器倍增并转换成电信号输给视频放大器放大进入阈值电路,再由计数器计算从激光发射至接收目标回波期间进入的脉冲数,由此解算出距离,经显示器显示出来。因此光电探测器是提高仪器探测灵敏度的关键器件。光电探测器有光电二极管(PD)和雪崩光电二极管(APD)两大类。目前脉冲激光测距仪主要采用硅雪崩光电二极管(Si-APD)。它把接收到的光信号转换成  $M$  倍电信号传送给视频放大器。但是 Si-APD 在倍增过程中产生的附加噪声又成了限制信噪比进一步提高的障碍<sup>[2,3]</sup>。

当信噪比  $SNR = 1$  时, Si-APD 器件的最小可探测功率为

$$P_{r,\min} = [h\nu/(M\eta e)] [4kTB F_n/R_L + 2eM^2 B F_m (I_p + I_b + I_d)]^{1/2} \quad (2)$$

式中  $h$  为普朗克常数;  $\nu$  为激光光波频率;  $M$  为电流倍增因子;  $\eta$  为量子效率;  $e$  为电子电荷;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $B$  为接收器带宽;  $F_n$  为放大器噪声系数;  $R_L$  为等效负载电阻;  $F_m$  为与倍增过程有关的噪声系数;  $I_p$ ,  $I_b$ ,  $I_d$  分别为探测器输入信号电流、背景噪声电流和 Si-APD 器件本身的体漏电流。

根据上述物理概念可以得出脉冲激光测距仪对大目标的测距公式为

$$P_r/(A_r K_r) = P_e K_r \rho \exp(-2\alpha L)/(\pi L^2), \quad (3)$$

式中  $P_r/(A_r K_r)$  为接收光学系统单位面积上的探测功率,  $K_r$  为接收光学系统的透射率。

由(3)式,接收器从目标探测到的光功率为

$$P_r = P_e K_r A_r K_r \rho \exp(-2\alpha L)/(\pi L^2). \quad (4)$$

## 2.2 理论计算

图2是脉冲激光测距仪测距系统示意图。它由激光发射器、接收器、被测目标和发

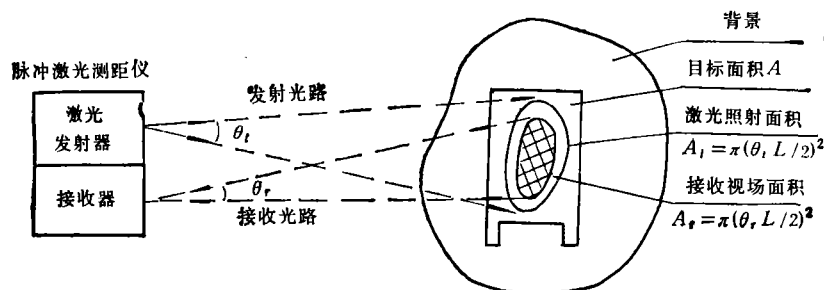


图2 脉冲激光测距仪测距系统示意图

射、接收光路组成。

若图2中激光发射功率为 $P_t$ ，发散角为 $\theta_t$ ；接收功率为 $P_r$ ，接收视场角为 $\theta_r$ 。由(1)式知，激光到达 $L$ 处目标面上的功率为 $P_t K \exp(-\alpha L)$ ，在目标面上的照射面积为 $A_t = \pi(\theta_t L/2)^2$ ；接收视场面积为 $A_r = \pi(\theta_r L/2)^2$  ( $A$ 为目标面积)。

当 $A > A_t$ 时为大目标测距，反之则为小目标测距。为了减少背景光噪声的影响，应在Si-APD的光敏面前端设置小孔光阑，其视场角为 $\theta_r$ 。当 $\theta_r < \theta_t$ 时对减少背景光噪声有利，但接收灵敏度会降低；当 $\theta_r > \theta_t$ 时对三轴平行度校正和接收灵敏度提高有利，但背景噪声会随之增大。因此，脉冲激光测距仪的 $\theta_t$ 和 $\theta_r$ 两项参数应在仪器整体设计中综合考虑。

下面分两种情况对仪器的探测灵敏度和测距能力进行理论计算和分析。

(1) 若脉冲激光测距仪是对大目标测距且 $\theta_r > \theta_t$ 时，(3)式可变换为

$$(P_t K_r) / [P_r / (A_t K_t)] = [(\pi L^2) / \rho] \exp[2\alpha L], \quad (5)$$

式中左边是测距仪的内部参数，直接决定仪器的灵敏度或测距能力；右边是测距仪对大目标测距的外部参数，其中 $\alpha$ 可近似用 $\alpha \approx 2.7/V$ 算出 ( $V$ 为能见距离)。

如进入接收器的回波光功率等于维持最小正常测距功率 $P_{r,\min}$ 时，仪器的测距能力最大，探测灵敏度最高。这时仪器的探测灵敏度 $S_G$ 可以用常用对数乘以10表示<sup>[4]</sup>：

$$S_G = 10 \lg \{ P_t K_r / [P_{r,\min} / (A_t K_t)] \} = 10 \lg \{ (\pi L_{\max}^2) / \rho \exp[2\alpha L_{\max}] \}. \quad (6)$$

上式就是脉冲激光测距仪对大目标测距时全系统的综合测距灵敏度。

由(6)式可得仪器的内部探测灵敏度为

$$S_{G_I} = 10(\lg P_t + \lg K_r + \lg A_t + \lg K_t - \lg P_{r,\min}), \quad (7)$$

式中 $P_t, K_r, A_t$ 和 $K_t$ 越大， $P_{r,\min}$ 越小，仪器的内部探测灵敏度 $S_{G_I}$ 就越高，且与外部参数无关。

由(6)式还可得仪器对目标测距的外部灵敏度为

$$S_{G_O} = 10[\lg \pi + \lg L_{\max}^2 + \lg \exp(2\alpha L_{\max}) - \lg \rho]. \quad (8)$$

由上式可见，外部探测灵敏度 $S_{G_O}$ 与 $L_{\max}, \alpha$  ( $\alpha = 2.7/V$ ) 和 $\rho$ 有关。

当 $\rho = 1, \alpha = 2.7/V$ 时，由(8)式计算可得表1所示的相对的外部探测灵敏度 $S_{G_O}$ 与最大测距能力 $L_{\max}$ 和能见距离 $V$ 的关系。结果与(7)式所示的仪器的内部探测灵敏度 $S_{G_I}$ 的计算结果基本一致。

表 1 灵敏度与最大测距能力和能见距离的关系 ( $\rho = 1$  时)

$L_{max}$ (km)	$V$ (km)	$S'_{Go}$ (dB)						
		60	40	20	10	5	2	1
1		5.36	5.55	6.13	7.28	9.59	16.52	28.08
3		15.67	16.25	17.98	21.45	28.38	49.17	83.82
5		20.88	21.84	24.73	30.50	42.06	76.71	
7		24.58	25.92	29.96	38.05	54.22		
9		27.52	29.25	34.45	44.85	65.64		
10		28.82	30.75	36.52	48.08	71.18		
11		30.04	32.15	38.51	51.21			
13		32.26	34.76	42.27	57.29			
15		34.26	37.16	45.82	63.15			
17		36.13	39.44	49.22	68.85			
19		37.86	41.52	52.50				
20		38.69	42.54	54.10				
25		42.56	37.37	61.81				
30		46.07	51.84	69.17				

(2) 若脉冲激光测距仪是对小目标测距且  $\theta_r < \theta_t$  时, 仪器从目标接收到的回波光功率缩小为  $1/(\theta_r/\theta_t)^2$ , 照射于目标上的部分光功率被超出面积  $(A_t - A_r)$  逸散损耗掉了。因此, 应在(5)式右边乘上一个系数  $A/[\pi(\theta L_{max}/2)^2]$  后即得出仪器从目标探测到的最小光功率为<sup>[5]</sup>

$$P_{rmin} = \{P, K, A_r, \rho K, \exp(-2\alpha L_{max})/(\pi L_{max}^2)[A/[\pi(\theta L_{max}/2)^2]]\}, \quad (9)$$

式中  $\theta = \theta_r/\theta_t$ ;  $A$  为目标面积。

由(9)式变换后并用常用对数乘以 10 得

$$\begin{aligned} S_s &= 10 \lg \{P, K, / [P_{rmin}/(A_r K)]\} \\ &= 10 \lg \{(\pi L_{max}^2/\rho) \exp[2\alpha L_{max}][\pi\theta^2 L_{max}^2/(4A)]\}. \end{aligned} \quad (10)$$

上式就是脉冲激光测距仪对小目标测距时的全系统综合测距灵敏度。

### 3 试验结果的分析 and 讨论

经过对(6)式的认真研究和计算, 发现表 1 中的灵敏度并不是脉冲激光测距仪本身具有的最大内部探测灵敏度  $S_{GI}$ , 而是相对的外部探测灵敏度  $S'_{Go}$ , 它们间之差来自大气对光束的衰减 ( $\alpha \approx 27/V$ ), 其次是地形和目标的性质 ( $\rho$ )。本文引入消光比就是为了检测脉冲激光测距仪具有的真实最大内部探测灵敏度  $S_{GI}$ 。

#### 3.1 灵敏度与消光比的关系

当用测距仪按图 2 所示方法对近距离  $L_0$  (如 500m) 和大目标 ( $A > A_r, A > A_t$ ) 标准靶 (靶面反射系数为  $\rho_0$ , 大气衰减系数为  $\alpha_0$ ) 测距, 并在激光测距仪的发射窗前面或接收窗前面插入  $M$ (dB) 衰减片时, 激光功率将衰减为  $1/M$  达到“测距临界状态”。这时(6)式可变换为<sup>[6]</sup>

$$\begin{aligned}
 S_G &= 10 \lg \{ P_r K_r / [P_{r, \min} / (A_r K_r)] \} = 10 \lg \{ \pi L_{\max}^2 / \rho \} \exp[2\alpha L_{\max}] \\
 &= 10 \lg \{ M(\pi L_0^2 / \rho_0) \exp[2\alpha_0 L_0] \}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

上式就是脉冲激光测距仪的探测灵敏度与消光比的关系。

由(11)的右边计算得

$$\begin{aligned}
 S_G &= 10 \lg \{ M(\pi L_0^2 / \rho_0) \exp[2\alpha_0 L_0] \} = 10 \lg M + 10 \lg(\pi L_0^2 / \rho_0) + 10 \lg \exp(2\alpha_0 L_0) \\
 &= N + S(\rho_0) + S(\alpha_0),
 \end{aligned} \tag{12}$$

式中  $N$  为光路中所加衰减片的总分贝值;  $S(\rho_0)$  为靶面修正值;  $S(\alpha_0)$  为气象修正值。

综上所述,模拟测距消光比测试方法就是脉冲激光测距仪在  $L_0$  为标准值(如 500m)条件下,对标准大目标靶(靶面尺寸:  $A > A_r$ ,  $A > A_i$ ; 靶面反射系数:  $\rho_0 > 0.85$ ) 保持正常测距时,插入测距仪发射窗前面或接收窗前面的  $M(\text{dB})$  衰减片将进入接收器的激光回波功率衰减为  $1/M$  达到“测距临界状态”的测试方法。如果在大气条件较好,能见距离长于 3km 条件下,采用这种方法来检测仪器的灵敏度,能有效地消除气象差异的影响和地形条件的限制。这时所测得的消光比分贝值很接近脉冲激光测距仪的探测灵敏度,从而得出它的最大测距能力。

### 3.2 灵敏度计算

**3.2.1 标准仪器选用** 为保证测试数据和计算数据准确,便于比较,选最大测距能力分别为 5km, 10km 和 30km 的脉冲激光测距仪各 2 台,代号分别为  $A_1$  和  $A_2$ ,  $B_1$  和  $B_2$ ,  $C_1$  和  $C_2$ 。

根据仪器的整体设计要求,  $A_1$  和  $A_2$  测距仪在能见距离  $V$  为 18km 条件下,对  $\rho = 0.08$  的  $2.3\text{m} \times 2.3\text{m}$  黑色轿车测距,最大测距能力为 5km,  $\theta_r = 0.8\text{mrad}$ ,  $\theta_i = 1\text{mrad}$ ;  $B_1$  和  $B_2$  测距仪在能见距离  $V$  为 20km 条件下,对  $\rho = 0.29$  的  $5\text{m} \times 8\text{m}$  红砖墙测距,最大测距能力为 10km,  $\theta_r = \theta_i = 1\text{mrad}$ ;  $C_1$  和  $C_2$  测距仪在能见距离  $V$  为 60km 条件下,对  $\rho = 0.08$  的  $25\text{m} \times 20\text{m}$  千吨级海运货船测距,最大测距能力为 30km,  $\theta_r = \theta_i = 1\text{mrad}$ 。

**3.2.2 灵敏度计算** 将  $A_1$  和  $A_2$ ,  $B_1$  和  $B_2$ ,  $C_1$  和  $C_2$  测距仪的上述设计指标分别代入(10)式计算各台仪器的测距灵敏度为

$$S_{A_1, A_2} = 40.2\text{dB}; S_{B_1, B_2} = 44.99\text{dB}; S_{C_1, C_2} = 58.71\text{dB}.$$

### 3.3 消光比测试

**3.3.1 测试条件** 测试目标靶距  $L_0 = 500\text{m}$ , 靶面尺寸  $A_0 = 0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ , 靶面反射系数  $\rho_0 > 0.85$ , 靶面与激光束的垂直度为  $90^\circ$ , 不垂直度小于  $5^\circ$ , 能见距离  $V > 3\text{km}$ 。

**3.3.2 测试方法**  $A_1$  和  $A_2$ ,  $B_1$  和  $B_2$  激光测距仪分别在发射窗前或在接收窗前插入  $M(\text{dB})$  衰减片两种方式;  $C_1$  和  $C_2$  激光测距仪仅在发射窗前插入  $M(\text{dB})$  衰减片一种方式。

**3.3.3 测试数据** 脉冲激光测距仪消光比实测分贝值见表 2, 测试数据统计为

$$N_{A_1, A_2} = 41.84\text{dB}; N_{B_1, B_2} = 46.87\text{dB}; N_{C_1, C_2} = 61.09\text{dB}.$$

### 3.4 测试和计算数据比较

$$\text{仪器 } A_1, A_2: \Delta N_A = N_A - S_A = 41.84 - 40.2 = 1.64\text{dB};$$

表 2 脉冲激光测距仪消光比实测分贝值

仪器类型		$V(\text{km})$	$N(\text{dB})$						平均	总平均		
			阴雨 >3	雾 >4	小雾 >5	多云 >6	多云 >7	晴 >8				
A <sub>1</sub>	发射窗前	插入最大 衰减片	41.40	41.57	42.06	42.57	43.25	43.35	42.22	41.84		
	接收窗前		40.38	40.65	41.85	42.16	43.56	43.83				
A <sub>2</sub>	发射窗前		39.65	40.75	41.18	41.36	42.05	43.05	41.46			
	接收窗前		40.00	40.98	41.45	41.83	42.26	43.03				
B <sub>1</sub>	发射窗前		45.56	45.68	46.48	46.71	48.16	48.83	47.18		46.87	
	接收窗前		46.56	46.92	47.07	47.35	48.20	48.64				
B <sub>2</sub>	发射窗前		45.65	45.78	46.52	46.79	46.93	47.45	46.56			
	接收窗前		45.72	45.93	46.60	46.72	46.95	47.65				
C <sub>1</sub>	发射窗前		59.90	60.25	60.54	60.87	61.12	61.25	60.66			61.09
C <sub>2</sub>	发射窗前		60.65	60.65	61.65	61.95	62.02	62.24	61.56			

仪器 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>:  $\Delta N_B = N_B - S_B = 46.87 - 44.99 = 1.88\text{dB}$ ;

仪器 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>:  $\Delta N_C = N_C - S_C = 61.09 - 58.71 = 2.38\text{dB}$ 。

### 3.5 分析

- (1)  $N$  和  $S$  的分贝值均很接近,  $\Delta N$  在 3dB 以内;
- (2) 误差  $\Delta N$  随仪器的测距能力的增大而增大, 且始终保持  $N > S$ , 说明气象条件影响仪器的测距能力。

### 3.6 讨论

**3.6.1 消光比测试中对靶距  $L_0$ 、靶面尺寸  $A_0$  和靶面反射系数  $\rho_0$  的要求** 从(12)可看出,  $L_0$  取值越小,  $S(\rho_0)$  和  $S(\alpha_0)$  两项修正值也越小, 但应服从: (1)  $L_0$  应大于脉冲激光测距仪的最小测程, 否则仪器不能正常测距; (2) 应考虑发射和接收光轴以及基线 ( $B$ ) 对近距离  $L_0$  消光比测试的影响(图 3), 即  $B/L_0 \leq (1/10 \sim 1/20)\theta$ ; (3) 靶面尺寸  $A_0$  应大于激光照射在靶面上的面积(见图 2), 即测距仪对标准大目标靶面模拟测距; (4) 标准靶面反射系数  $\rho_0$  需经标定, 应大于 0.85, 以尽量减少激光束在靶面上的反射损耗。

**3.6.2 衰减片的放置** 根据消光比测试原理和表 2 中 A, B 两类仪器的实测

$N(\text{dB})$  值数据比较, 衰减片插入测距仪的发射窗前或接收窗前均是等效的。为了提高仪器的探测灵敏度, 多数脉冲激光测距仪的接收视场角  $\theta_r$  设计大于激光发散角  $\theta_s$ , 相应增大了接收光学系统的孔径。而衰减片受到制作工艺的尺寸限制, 不能全部覆盖接收孔径, 需在接收窗前面加直径为  $D_d$  的光阑, 这将导致测距仪的接收面积和接收光功率均减小

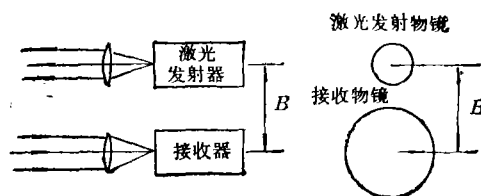


图 3 激光发射器和接收器光轴示意图

为  $1/(A_r/A_d)$ , 消光比测试数据也将相应减小  $10 \lg(A_r/A_d)$  (dB)。因此, 消光比测试中衰减片插入发射窗前比插入接收窗前更合理。

**3.6.3 “临界状态”测距次数** “测距临界状态”是一种非稳定状态。在确保仪器一定的准测率和虚警率条件下, 测距仪连续对标准靶面模拟测距 10 次, 每次均能准确测出标准靶面的距离值时认为达到“测距临界状态”, 如再增大衰减片的  $M$  (dB) 值, 上述 10 次测试中即使有 1 次出现误测也不符合测试要求。

**3.6.4 定时脉冲增益 (TPG, timing Pulse gain) 电路的处理** 目前以高增益的 Si-APD 为探测器件的脉冲激光测距仪, 用 TPG 电路控制仪器的增益。最小测程时将增益控制到最小; 随测程增大增益也提高。靶距  $L_0 = 500\text{m}$  处很接近仪器的最小测程, 此时激光对仪器的后向散射不可避免, 因此测消光比时应将 TPG 电路断开(或短路), 并插入数十分贝衰减片, 以消除激光对仪器后向散射的影响。

**3.6.5 气象修正** 影响脉冲激光测距仪最大测距能力的因素是光通道的气象条件, 如水蒸气吸收衰减、大气散射和阳光闪烁等。消光比测试就是为了克服气象条件的影响。从上述实测与计算数据的比较可以看出, 近距离  $L_0$  测消光比时, 气象修正值很小, 可以忽略不计; 同时, 可以免于室外测距能力检测, 排除了气象差异的影响和地形条件的限制。

### 参 考 文 献

- [1] 华中工学院, 等. 激光技术, 长沙: 湖南科学技术出版社, 1983, 第四、八、九章.
- [2] 林钧挺. 光电子技术及其应用, 北京: 国防工业出版社, 1983, 第三、五章.
- [3] McIntyre R. J. IEEE Trans. on ED, 1966, ED-13(1): 164—185.
- [4] Yariv A. Optical Electronics, New York: Academic, 1985, 47—50.
- [5] Arechi F T, et al. Laser Handbook, New York: SPIE, Vol. 2, 1972, 1787—1788.
- [6] World L F. Electro-Optics Handbook, New York: SPIE, Vol. 4, 1974, 89—90.

## RESEARCH ON THE SENSITIVITY AND EXTINCTION RATIO FOR PULSED LASER RANGE FINDERS

Tan Xianyu

(Huazhong Institute of Precision Instrument, Hubei, Zhicheng 443304)

**Abstract** The extinction ratio test of analogue ranging is adopted directly to check the sensitivity of pulsed laser range finders, then the influence of weather and the limitation of terrain in long-distance ranging can be eliminated effectively. By analyzing the test data obtained and comparing them with the range measuring ability, it shows that this check method is effective.

**Key words** Pulsed laser range finders, Sensitivity, Extinction ratio, Check