

# 脉冲激光测距机消光比测试研究

胡继先

(曙光仪器厂)

本文对脉冲激光测距机消光比测试原理进行了详尽分析。提出了消光比指标的计算方法和测试的具体方案,并提出按两点消光比数据测定大气衰减系数的新方法。

## Research of the extinction test for the pulse laser rangefinder

Hu Jixian

(Shuguang Instrument Factory)

### Abstract

In this article a comprehensive analysis of the extinction test theory for the pulse laser rangefinder has been provided. An elegant method for calculating the extinction value of LRF and a concrete scheme of the extinction test, also a new method of atmospheric attenuation coefficient measurement according to twice extinction testing data were suggested by the author.

### 一、脉冲激光测距机消光比测试原理

如图1, 假定脉冲激光测距机激光器发射功率为 $P_t$ , 发射天线光学系统透射比为 $k_t$ , 经天线后激光发散角为 $\theta_t$ , 到达距离 $L$ 处目标面上的激光功率为 $P_t k_t e^{-\alpha L}$ ,  $\alpha$ 为大气衰减系数, 单位为 $1/km$ 。激光束在目标面上的照射面积为 $A_{0t} = \pi \left( \frac{\theta_t L}{2} \right)^2$ 。

如果目标面积 $A$ 大于 $A_{0t}$ , 所有照射激光功率皆参与漫反射, 此为大目标测距情况; 如果 $A$ 小于 $A_{0t}$ , 只有照射到目标面的那一部分激光光束参与漫反射, 此为小目标测距情况。为了减少背景光噪声的不良影响, 在接

收物镜焦面附近光电探测器光敏面前设置小孔光阑, 该小孔光阑在物空间投影形成接收视场

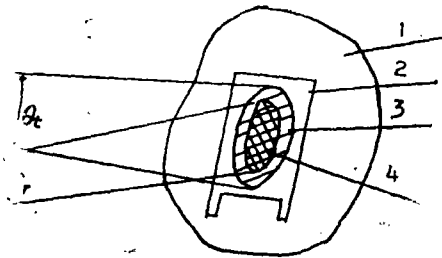


图1 脉冲测距系统直观模型

1.背景 2.目标面积 $A$  3.激光照射面积

$$A_{0t} = \pi \left( \frac{\theta_t L}{2} \right)^2 \quad 4.接收视场面积$$

$$A_{0r} = \pi \left( \frac{\theta_r L}{2} \right)^2$$

角 $\theta_r$ ，一般应使 $\theta_r$ 与 $\theta_t$ 相等， $\theta_r < \theta_t$ 对减少背景光噪声有利， $\theta_r > \theta_t$ 对发射光轴接收光轴瞄准光轴三轴一致性较正有利。激光测距机三轴一致性校正精度要求达到 $0.1\text{mrad}$ 以内。从目标面漫反射回来的激光只有进入小孔光阑方可到达光电接收器，当 $\theta_r < \theta_t$ 时，实际起限制光束作用的将是 $\theta_r$ 。假定激光在目标面上漫反射服从朗伯定律，当 $\theta_r \geq \theta_t$ ，在大目标测距情况，到达光电接收器的激光功率为 $P_r$ ，

$$P_r = P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L} / \pi L^2 \quad (1)$$

式中， $A_r$ 为接收物镜面积， $k_r$ 为接收光学系统的透射比， $\rho$ 为目标面的漫反射率。

接近地面水平方向上大气对 $1.06\mu\text{m}$ 的激光衰减主要因素是水蒸气的吸收和大气中悬浮的尺寸接近光波波长的微粒散射。对 $1.06\mu\text{m}$ 激光，大气衰减系数 $\alpha$ 可按下述经验公式计算

$$\alpha V = 2.7 \quad (2)$$

式中， $V$ 为气象视距以 $\text{km}$ 计。所谓气象视距是指对本身不发光也不反光的物体用肉眼观察，若该物体与天空背景亮度差与背景本身亮度之比大于 $2\%$ ，则标准人眼能从背景中辨别该目标，此时该目标的距离 $V$ 定义为气象视距。

测程公式(1)中的 $P_r$ 为测距机接收光敏面上获得的激光回波功率， $P_r$ 转换成电信号脉冲，经放大后的脉冲信号如果超过门限电平阈值，则可测得目标的距离 $L$ 。当 $P_r$ 小到一定程度，放大后的脉冲信号刚能稳定地达到阈值电平，此时的 $P_r = P_{r,\text{min}}$ 为测距机的最小可探测功率，按公式(1)与 $P_{r,\text{min}}$ 相对应的目标距离 $L = L_{\text{max}}$ 为测距机的最大测程。最大测程情况下

$$P_{r,\text{min}} = P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L_{\text{max}}} / \pi L_{\text{max}}^2 \quad (3)$$

用该测距机去测量近距离 $L_0$ 的大目标标准靶，靶面漫反射率 $\rho_0$ 为已知，测试时的大气衰减系数为 $\alpha_0$ ，并在激光光路中(发射窗或接收窗前)插入平行平板衰减片，使激光功率减弱 $M$ 倍达到测距临界状态，此时

$$P_{r,\text{min}} = \{ P_t k_t A_r k_r \rho_0 e^{-2\alpha_0 L_0} / \pi L_0^2 \} / M$$

上式与公式(3)比较，可得

$$M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{-2\alpha_0 L_0} = \frac{\pi L_{\text{max}}^2}{\rho} e^{-2\alpha L_{\text{max}}} = \frac{P_t k_t}{P_{r,\text{min}} / A_r k_r}$$

消光比的定义是将上式取以10为底的对数再乘以10，即

$$\begin{aligned} S &= 10 \lg \left( M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{-2\alpha_0 L_0} \right) \\ &= 10 \lg \left( \frac{\pi L_{\text{max}}^2}{\rho} e^{-2\alpha L_{\text{max}}} \right) \\ &= 10 \lg \left( \frac{P_t k_t}{P_{r,\text{min}} / A_r k_r} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

从(4)式看消光比 $S$ 的物理意义，也可以说 $S$ 就是激光测距机全系统的综合测距灵敏度。如果按战技要求对大目标测距，测距机的 $\theta_r < \theta_t$ ，此时测程公式(3)修正为

$$P_{r,\text{min}} = \left\{ P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L_{\text{max}}} / \pi L_{\text{max}}^2 \right\} \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2$$

测消光比时

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L_{\max}} / \pi L_{\max}^2) \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2 / M$$

可得

$$M \frac{\pi L_0^2}{\rho} e^{2\alpha_0 L_0} = \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} = \frac{P_t k_t \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2}{P_{r, \min} / A_r k_r}$$

消光比指标按测距机外部表现计算

$$S = 10 \lg \left( \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} \right) \quad (5)$$

如果战技要求是对小目标测距，且测距机的  $\theta_r \leq \theta_t$ ，测程公式 (3) 修正为

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L_{\max}} / \pi L_{\max}^2) \frac{A}{\pi \left( \frac{\theta_t L_{\max}}{2} \right)^2}$$

消光比测试时

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho_0 e^{-2\alpha_0 L_0} / \pi L_0^2) / M$$

可得

$$M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha_0 L_0} = \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} \frac{\frac{\pi}{4} \theta_t^2 L_{\max}^2}{A} = \frac{P_t k_t}{P_{r, \min} / A_r k_r}$$

消光比指标计算公式为

$$S = 10 \lg \left( \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} \frac{\frac{\pi}{4} \theta_t^2 L_{\max}^2}{A} \right) \quad (6)$$

如果战技要求是对小目标测距，且测距机的  $\theta_r < \theta_t$ ，目标面积  $A$  比  $A_{0r}$  大，比  $A_{0t}$  小，此时测程公式 (3) 修正为

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha L_{\max}} / \pi L_{\max}^2) \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2$$

消光比测试时

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho_0 e^{-2\alpha_0 L_0} / \pi L_0^2) \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2 / M$$

因此可得

$$M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha_0 L_0} = \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} = \frac{P_t k_t \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2}{P_{r, \min} / A_r k_r}$$

消光比指标计算公式为

$$S = 10 \lg \left( \frac{\pi L_{\max}^2}{\rho} e^{2\alpha L_{\max}} \right) \quad (7)$$

如果战技要求是对小目标测距，且测距机的  $\theta_r < \theta_t$ ，同时目标面积  $A$  小于接收视场面积  $A_{0r}$ ，此时测程公式 (3) 修正为

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho e^{-2\alpha_0 L_{max}} / \pi L_{max}^2) \frac{A}{\pi \left( \frac{\theta_r L_{max}}{2} \right)^2}$$

消光比测试时

$$P_{r, \min} = (P_t k_t A_r k_r \rho_0 e^{-2\alpha_0 L_0} / \pi L_0^2) \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2 / M$$

因此可得

$$M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha_0 L_0} = \frac{\pi L_{max}^2}{\rho} e^{2\alpha_0 L_{max}} \left( \frac{\frac{\pi \theta_r^2 L_{max}^2}{4}}{A} \right) = \frac{P_t k_t \left( \frac{\theta_r}{\theta_t} \right)^2}{P_{r, \min} / A_r k_r}$$

此时消光比指标计算公式为

$$S = 10 \lg \left[ \frac{\pi L_{max}^2}{\rho} e^{2\alpha_0 L_{max}} \left( \frac{\frac{\pi \theta_r^2 L_{max}^2}{4}}{A} \right) \right] \quad (8)$$

综上, 根据战技要求所规定的不同目标条件得到公式(4)到(8)五种不同情况的消光比指标计算方法, 但这五种不同情况下消光比测量中,  $M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha_0 L_0}$  是一个不变量, 因此消光比测量的工作公式为

$$\begin{aligned} S &= 10 \lg \left( M \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha_0 L_0} \right) \\ &= 10 \lg M + 10 \lg \left( \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} \right) + 10 \lg (e^{2\alpha_0 L_0}) \\ &= N_A + S(\rho_0) + S(\alpha_0) \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $N_A = 10 \lg M$  为光路中所加衰减片的总衰减值, 以dB为单位;  $S(\rho_0) = 10 \lg \left( \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} \right)$  为与靶板有关的消光比修正值;  $S(\alpha_0) = 10 \lg (e^{2\alpha_0 L_0})$  为与气象条件有关的消光比修正值。

## 二、消光比测试方案

根据消光比测量的工作公式(9)制订测试消光比的具体方案, 有关问题讨论如下:

### 1. 衰减片的放置

从消光比测试原理看出, 衰减片加在发射窗前或加在接收窗前是等效的, 但加在发射光路中比较合理, 因为挡接收光路会使背景光噪声人为地减弱。近代激光测距机的接收光电转换多采用硅雪崩管, 硅雪崩管的工作偏压由噪声控制, 背景光噪声和雪崩电路噪声同时起控制偏压作用, 因此挡接收衰减方式会使背景光噪声减弱, 雪崩管偏压将有所升高, 总的接收灵敏度稍有提高, 将影响消光比的正确评价。再则在瞄准与接收共用一个物镜的光学系统中, 衰减片加在接收物镜前会使观察视场变黑, 测手看不到靶板和分划板刻线, 无法在测量过程中

监视瞄准点是否发生走动。第三、接收窗尺寸一般比发射窗尺寸大,例如某些远程激光测距机接收物镜口径可能超过100mm,成套衰减片尺寸太大制备困难,如果加光阑后用小口径衰减片测量则要引入光阑衰减修正值,影响消光比的测试精度。

## 2. 靶距 $L_0$ 的取值问题

从工作公式(9)看, $L_0$ 取值小则 $S(\rho_0)$ 和 $S(\alpha_0)$ 两项修正值也小, $S(\rho_0)$ 甚至会出现负值。但 $L_0$ 并不是越小越好,首先 $L_0$ 一定要大于测距机的最小测程 $L_{\min}$ (一般为100~200m),否则不可能进行正常测距。另外主要应当考虑发射与接收不同轴时的基线(B)在近距离上带来的三轴平行性误差。为使三轴平行性在测消光比时能保持在0.1mrad左右,不致带来消光比测量的原理误差,应使:

$$\frac{B}{L_0} \leq \left( \frac{1}{10} \sim \frac{1}{20} \right) \theta_t$$

例如某产品 $B=35\text{mm}$ , $\theta_t=1\text{mrad}$ ,按公式(10)计算得 $L_0=350\sim 700\text{m}$ 。而当 $B=100\text{mm}$ , $\theta_t=1\text{mrad}$ ,则 $L_0=1000\sim 2000\text{m}$ 。

## 3. $\rho_0$ 的取值

推导测距方程的前提是假定目标漫反射特性符合朗伯定律。虽然测距机实际使用时所要探测的战术目标各色各样,大部分情况属于部分漫反射,而且也不大可能是与激光束垂直的整体平面,因此对于实际目标只能有效反射率和有效反射面积近似模拟。测试消光比,为使测试数据可靠,靶面应该是标准的漫反射面,尽可能符合朗伯定律, $\rho_0$ 值的高低没有多大影响,只要事先能将其准确标定。靶板安装应注意使靶面垂直于激光光束。为满足大目标条件,如果 $L_0=500\text{m}$ , $\theta_t=1\text{mrad}$ ,则靶板尺寸至少应取 $0.6\times 0.6(\text{m}^2)$ 。

## 4. 成套衰减片的设计

成套衰减片国外用特制感光胶片以不同感光黑度获得所需各种衰减值。考虑到胶片薄、易变形,平面度平行性难保证,若放在发射窗前胶片易受激光损伤,因此采用玻璃平行平板。消光比测试范围最大约为70dB,设想测试时每次可插入三片,则成套衰减片应有0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30这十种规格;其中30dB者每套2件,其余每种1件。大分贝值10, 20, 30dB三种采用不同牌号的有色玻璃制造,厚度统一规定为3mm,10dB的可用QB11,20dB的可用AB7,30dB的可用AB8。尾数部分0.5~9dB十种用普通无色光学玻璃制成平行平板厚度亦为3mm,双面抛光,不规则优于0.5道,平行差优于5",一个面真空镀铬,控制不同的铬层厚度以达到所要求的衰减值。因为铬层并非完全吸收,表面反射率较大,如果直接加在发射窗前,反射回激光器内的激光有可能损伤内部光学件膜层,再则三片叠在一起测量,当各片严格相互平行时,有可能形成片间多次反射,引起消光比的测量误差。因此10, 20, 30dB三种不应该用镀铬件,测量时只用一块镀铬衰减片,而且让它位于深色吸收衰减片之后,不要紧靠激光发射窗口。10, 20, 30dB吸收式衰减片,双面镀增透膜以防止反射光,同时可对玻璃起保护作用。成套衰减片的衰减值经准确标定后将各自的分贝值刻在镜框上以便识别。

## 6. TPG电路改进

以雪崩管为接收器件的激光测距机为了解决近距离激光大气后向散射问题,都没有时间程序自动增益电路(简称TPG),在TPG控制下最小测程 $L_{\min}$ (一般为150m左右)下放大器增

益最小,放大器增益随测程的增加而自动增大,到测程为3km左右达到最大值并在以后保持不变。测量消光比靶距 $L_0$ 一般选在0.5到2km之间,正是TPG电路起作用的范围,在 $L_0 = 5\text{km}$ 处放大器增益衰减约为20dB,该值随具体产品而异,无法准确给出修正值。因此为了贯彻消光比测试方法,激光测距机TPG电路应稍加修改,可将TPG信号控制线接到距离选通电位计的闲置开关上。测消光比时将距离选通旋钮转至最小并过开关位置,此时放大器将不受TPG的控制,近距离亦处于全增益状态。至于后向散射问题,因为测消光比时插入几十分贝的衰减片达到测距临界状态,早已不存在后向散射的影响。

### 三、消光比气象修正和大气衰减系数测试

接近地面水平路径上大气对激光功率的衰减的主要因素是水蒸气的吸收和悬浮在大气中的颗粒的米氏散射。

#### 1. 水蒸气的吸收

为了计算一定的大气路径长度上水蒸气对波长 $1.06\mu\text{m}$ 激光的吸收,首先要确定该路径长度内大气中水蒸气的含量。水蒸气含量可表达为可凝水,可凝水定义为单位长度某一截面测量路径上的水蒸气假想压缩成截面相同某一厚度的水层,其单位为 $\text{mm}/\text{km}$ 。设大气的绝对湿度为 $W\text{g}/\text{m}^3$ ,因水的密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ ,经单位换算可得

$$W = b \quad (11)$$

可凝水 $b$ 与 $W$ 单位不同而数值相等。

大气中处于平衡状态的饱和水蒸气含量为饱和绝对湿度,不同温度下的饱和绝对湿度可查手册,如测得当时的大气温度和相对湿度,即可求得绝对湿度 $W$ ,亦即可凝水 $b$ 。 $b$ 乘以测量路径长度后得可凝水总厚度 $b'$ , $b'$ 与 $1.06\mu\text{m}$ 波长光谱透过率的关系如下表<sup>[5]</sup>。

表1

| 波长<br>( $\mu\text{m}$ ) | 可凝水总厚度 $b'$ (mm) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 0.1              | 0.2   | 0.5   | 1     | 2     | 5     | 10    | 20    | 50    | 100   | 200   | 500   | 1000  |
| 1.00                    | 0.990            | 0.986 | 0.977 | 0.968 | 0.955 | 0.929 | 0.900 | 0.860 | 0.779 | 0.692 | 0.575 | 0.375 | 0.210 |
| 1.10                    | 0.970            | 0.958 | 0.932 | 0.905 | 0.806 | 0.790 | 0.707 | 0.595 | 0.406 | 0.235 | 0.093 | 0.008 | 0     |
| 1.06<br>(线性内插)          | 0.978            | 0.969 | 0.950 | 0.930 | 0.902 | 0.846 | 0.784 | 0.701 | 0.555 | 0.418 | 0.286 | 0.155 | 0.084 |

例如温度 $23^\circ\text{C}$ 相对湿度75%测量光路长度为 $1.25\text{km}$ 时,查得 $23^\circ\text{C}$ 饱和绝对湿度为 $20.57\text{g}/\text{m}^3$ ,因此, $b' = 20.57 \times 75\% \times 1.25 = 19.28\text{mm}$ ,由表1,用曲线内插法求得 $1.06\mu\text{m}$ 波长时的光谱透过率为0.707,相当于衰减1.51dB。

#### 2. 米氏散射

如果大气温度较低,湿度很小,水蒸气吸收不显著,而大气散射是主导的衰减因素,则

$$N_1 - N_2 = 10 \lg \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) + 10 \lg e^{2\alpha_0 (12^{-11})} \quad (13)$$

式中,  $N_1, N_2, L_1, L_2, \rho_1, \rho_2$  为已知量, 解方程可求得  $\alpha_0$ 。为使  $\alpha_0$  测量有一定准确度, 应使  $L_1$  与  $L_2$  差别尽可能大一些。但  $L_2$  的大小受到标准白靶的尺寸限制, 靶太大难于制备, 一般取  $L_1 = 0.5 \text{ km}$ ,  $L_2 = 2 \text{ km}$  为宜。

#### 四、结果和讨论

##### 1. 测试样机

工厂生产经检验合格的某产品 A-59、A-72 两具, 该产品战技要求为能见度  $20 \text{ km}$ , 对模拟战术目标的  $5 \times 8 \text{ m}^2$  红砖墙其反射率为  $0.29$ , 最大测程  $10 \text{ km}$ ,  $\theta_r = \theta_t = 1 \text{ mrad}$ , 按公式 (6) 计算消光比指标为  $45.0 \text{ dB}$ 。样机测消光比前焊掉了 TPG 控制信号线。

工厂试制的某产品设计定型正样机 B-1、B-2 两具, 该产品战技要求为用本望远镜 ( $7\times$ ) 能识别坦克目标的天候条件 ( $V = 18 \text{ km}$ ), 对模拟坦克靶  $2.3 \times 2.3 \text{ m}^2$  军绿色靶面 ( $\rho = 0.08$ ), 最大测程  $5 \text{ km}$ ,  $\theta_r = 1 \text{ mrad}$ ,  $\theta_t = 0.8 \text{ mrad}$ , 按公式 (8) 计算消光比指标为  $40.2 \text{ dB}$ 。样机 TPG 电路作了修改, 测消光比时可用距离选通旋钮开关将 TPG 控制信号断开。

##### 2. 测试方法

制备有两套经准确标定的衰减片, 小口径的用于挡发射窗, 大口径的用于挡接收窗。标准漫反射靶靶面用特种  $\text{MgO}$  涂料, 其漫反射率经准确标定为  $0.978$ , 靶距  $L_0 = 0.625 \text{ km}$ , 靶面尺寸为  $0.8 \times 0.8 \text{ m}^2$ , 靶面与激光束的垂直性优于  $5^\circ$ 。测试现场安置温度表和相对湿度表。

表 3

| 轮次        | 1                   | 2                  | 3                  | 4                  | 5                  | 6                  | 7                  | 8                  | 9                  | 10                 | 总平均   |
|-----------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 消光比<br>样机 | 气候<br>薄雾<br>$V > 8$ | 晴<br>薄雾<br>$V > 8$ | 阴<br>小雾<br>$V > 5$ | 阴<br>小雨<br>$V > 5$ | 阴<br>小雾<br>$V > 5$ | 阴<br>薄雾<br>$V > 8$ | 阴<br>薄雾<br>$V > 8$ | 阴<br>小雾<br>$V > 5$ | 晴<br>无雾<br>$V > 8$ | 晴<br>无雾<br>$V > 8$ |       |
|           | A-59                | A-72               | B-1                | B-2                |                    |                    |                    |                    |                    |                    |       |
| 挡发射       | 46.71               | 46.71              | 48.83              | 48.16              | 46.69              | 46.79              | 45.56              | 45.69              | 46.48              | 45.68              | 46.83 |
| 挡接收       | 47.07               | 48.60              | 47.45              | 48.65              | 47.05              | 47.15              | 46.92              | 46.88              | 46.84              | 47.35              | 47.40 |
| 挡发射       | 46.71               | 46.71              | 45.78              | 46.71              | 46.69              | 46.79              | 46.56              | 46.52              | 45.65              | 45.68              | 46.38 |
| 挡接收       | 45.95               | 46.60              | 46.97              | 47.12              | 45.93              | 47.63              | 46.92              | 45.76              | 45.72              | 46.87              | 46.55 |
| 挡发射       | 43.85               | 43.85              | 42.06              | 43.03              | 43.83              | 43.06              | 43.70              | 41.97              | 41.93              | 41.96              | 42.92 |
| 挡接收       | 44.83               | 44.83              | 42.85              | 41.61              | 42.93              | 41.93              | 43.80              | 41.37              | 42.72              | 41.65              | 42.85 |
| 挡发射       | 42.16               | 42.98              | 41.00              | 42.21              | 41.08              | 41.18              | 40.75              | 39.65              | 36.52              | 36.55              | 40.41 |
| 挡接收       | 41.85               | 42.95              | 41.03              | 41.61              | 41.54              | 43.03              | 40.98              | 40.00              | 38.37              | 39.26              | 41.06 |

对波长 $1.06\mu\text{m}$ 的激光散射衰减系数为:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} 1.93^{-0.00005V^{1/2}}$$

式中,  $V$ 为气象视距。

因为激光测距机消光比指标计算时以经验公式 $\alpha V = 2.7$ 为前提, 测试消光比的大气衰减修正应以 $S(\alpha_0) = 10 \lg e^{2\alpha_0 L_0}$ 为基本依据。当 $L_0$ 为 $0.625\text{km}$ , 计算不同气象视距下的 $S(\alpha_0)$ 和 $S(\gamma_0)$ , 如表2所示。相同的 $V$ 所得 $S(\alpha_0)$ 略大于 $S(\gamma_0)$ , 因 $\alpha V = 2.7$ 经验公式中除米氏散射外还考虑了臭氧、瑞利散射和凝胶等总的散射因素。

表2

| V             | 3    | 4     | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 12    | 15    | 20    | 23.5  | 40    | 60    |
|---------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha_0$    | 0.90 | 0.675 | 0.54 | 0.45  | 0.386 | 0.338 | 0.300 | 0.270 | 0.225 | 0.180 | 0.135 | 0.115 | 0.068 | 0.045 |
| $\gamma_0$    | 0.75 | 0.53  | 0.41 | 0.324 | 0.268 | 0.226 | 0.195 | 0.171 | 0.135 | 0.101 | 0.069 | 0.055 | 0.026 | 0.015 |
| $S(\alpha_0)$ | 4.89 | 3.66  | 2.93 | 2.44  | 2.10  | 1.83  | 1.63  | 1.47  | 1.22  | 0.98  | 0.73  | 0.62  | 0.37  | 0.24  |
| $S(\gamma_0)$ | 3.26 | 2.88  | 2.23 | 1.76  | 1.45  | 1.23  | 1.06  | 0.93  | 0.73  | 0.55  | 0.37  | 0.30  | 0.14  | 0.08  |

### 3. 大气衰减系数 $\alpha$ 的测试

消光比测量工作公式(9)中第一项修正值为 $S(\rho_0) = 10 \lg \left( \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} \right)$ , 只要漫反射率 $\rho_0$ 测得准确数据 $S(\rho_0)$ 就不会发生疑问; 第二项修正值为 $S(\alpha_0) = 10 \lg e^{2\alpha_0 L_0}$ , 关键是要得到 $\alpha_0$ 的数据。按经验公式 $\alpha_0 V = 2.7$ 求 $\alpha_0$ , 则需测定气象视距 $V$ 。如果地形条件许可, 预先找一些远近不同的参考目标, 测消光比时用肉眼观察, 最远可以看清那个参考目标, 就可以估测出气象视距。估测虽然很难准确, 但对消光比修正影响不显著。测消光比时 $L_0$ 一般在 $1\text{km}$ 以内, 对 $1\text{km}$ 以内的标准白靶测距几乎不受气象条件限制, 但气象条件太坏, 例如能见度小于 $5\text{km}$ , 往往雾气很大且变化迅速, 大气衰减系数 $\alpha_0$ 没有一个稳定数据可言, 因此测试消光比一般应选择不下雨且无明显烟雾的天气, 气象视距最好能超过 $8\text{km}$ , 并不是任何坏天气下都能测消光比。

在气象条件比较稳定的天气, 用一台激光测距机对远近不同的两个标准白靶测定其消光比, 应有:

$$S = N_1 + 10 \lg \frac{\pi L_1^2}{\rho_1} + 10 \lg e^{2\alpha_0 L_1}$$

$$S = N_2 + 10 \lg \frac{\pi L_2^2}{\rho_2} + 10 \lg e^{2\alpha_0 L_2}$$

因为是用的同一台测距机, 两次测量所得消光比值 $S$ 应相等, 因为是同一气象条件下测量, 大气衰减系数 $\alpha_0$ 应该相同。因此可得:



产品在室内水泥台上的测角支架上固定，通过墙上窗口瞄准靶进行测距。

每具产品用衰减片挡发射窗和挡接收窗进行对比测试，各取10次读数，10次都得到靶的准确距离数字，求得测距临界状态下的衰减值总和 $N_A$ ，并按工作公式(9)求消光比 $S$ ，

其中， $S(\rho_0) = 10 \lg \frac{\pi L_0^2}{\rho_0} = 0.99 \text{dB}$ ，气象修正值 $S(\alpha_0)$ 则按所测现场温度湿度作水蒸

气吸收衰减修正，忽略大气散射。4具产品共作10轮，数据见表3。

再作测距临界状态下准测率试验，求得10次皆能准测的测距临界状态后逐级增加衰减值至每次都测不回来距离，然后回到测距临界状态增加测距次数到20次和50次，如不能次次准测，则逐级减少衰减值。

### 3. 测试结果讨论

(1) 挡发射窗和挡接收窗 从表3数据看，挡接收时的消光比值略高，但差别不大，因此挡发射，挡接收，或者既挡发射又挡接收均为可行。

(2) 气象修正值 如果气温较高湿度较大，且测试时，能见度不是太坏( $V > 5 \text{km}$ )，如果受地形限制看不到远近不同的参考目标，也不具备两个标准白靶的测试条件，只考虑水蒸气吸收衰减而忽略大气散射，虽然修正值略小，但实践证明这样取气象修正值基本可行。

(3) 确定测距临界状态的测距次数 美国休斯公司Stitch & Jahnsen 1967年的试验报告规定测距10次，其中有9次测定为测距临界状态，以确定消光比数据。我们的测试结果表明，“测距临界”是一种非稳状态，从刚能测回距离到10次都准测，其间过渡区约有5dB，从10次准测到50次都准测的过渡区还有1dB左右，随具体产品而异。因此确定测距临界状态的测距次数与战技指标中的准测率指标有关，准测率为90%的产品可以只测10次，准测率为95%的产品应该测20次，准测率为98%的产品应该测50次。

### 参 考 文 献

- (1) 《兵器激光》，1986年，第2期。
- (2) 《兵器激光》，1985年，第1期。
- (3)、(5) 张幼文著，《红外光学工程》，第2章。
- (4) M.L. Stich, Laser Handbook, 1972, Vol.2, Chap. F7.

\*

\*

\*

作者简介：胡继先，男，1929年11月出生。总工程师，高工。从事激光产品总体研究。

收稿日期：1988年9月23日。