

激光武器模拟器阈值光斑的空间分布

方启万 张晓晖

(海军工程学院 505 室, 武汉 430033)

提要: 本文从椭圆高斯光束的传输理论, 导出激光武器模拟器阈值光斑的传输方程, 修正和扩展了 ADA 102276 里的阈值光斑、最大射程、消光函数与辐照度的表达式, 并进行了实验验证。

关键词: 阈值光斑, 最大射程, 消光函数

Space distribution of threshold beam spot of laser weapon simulators

Fang Qiwan, Zhang Xiaohui

(Naval Academy of Engineering, Wuhan)

Abstract: Based on the transmission theory of the elliptical Gaussian beam, transmission equations of the threshold beam spot of laser weapon simulators were derived, which modify and expand the expressions of the threshold beam spot, the maximum range, the extinction function and the irradiance in ADA 102276, and the verification tests were made.

Key words: threshold beam spot, maximum range, extinction function

一、引 言

激光武器模拟器是军训器材, 以光代弹, 模拟各种武器, 再现武器效能, 并可模拟多兵种、诸武器的联合作战演习, 打破了真枪实弹打靶和战术演习的老传统, 节省弹药消耗, 减少装备磨损, 同时逼真、直观, 排除了裁判员人为判决因素, 提高军训素质, 节省大量军费。七十年代中期以来, 已形成许多系列产品, 装备了一百多个国家的武装部队, 可模拟炮弹、导弹、火箭、子弹等三十六种武器。

为模拟武器射程和弹散分布, 确保有效杀伤概率与距离的关系和实际武器相匹配, 必须研究模拟器阈值光斑的传输特性, 国外的权威研究成果见文献[1], 但其研究的假设前提条件是高斯光束为圆形, 而实际国内外模拟器输出高斯光束均为椭圆, 且椭圆率往往较大。本文试图根据椭圆高斯光束的理论^[2,3], 修正和扩展文献[1]中的传输方程, 并进行实测验证。

二、理论分析

激光模拟器的输出功率与辐照度的关系为

$$P_0 = \int_{A(z)} H(x, y, z) dA(z) \quad (1)$$

$A(z)$ 和 $dA(z)$ 分别为 z 处的辐射面积和辐射面元。目前模拟器光源, 国内外均用半导体激光器, 其发射光学天线皆由简单透镜构成, 故半导体激光器输出的椭圆高斯光束经透镜变换后仍为椭圆高斯光束, 因此模拟器辐照度函数在光轴 z 的垂直平面上为椭圆高斯型, 由解波动方程和 Lambert 定理可得

$$H(x, y, z) = H_0 \frac{\omega_{0x}\omega_{0y}}{\omega_x(z)\omega_y(z)} \exp\left[-\frac{2x^2}{\omega_x^2(z)} - \frac{2y^2}{\omega_y^2(z)} - \alpha z\right] \quad (2)$$

式中 H_0 是 $x=y=z=0$ 时的最大中心辐照度; ω_{0x} 、 ω_{0y} 和 $\omega_x(z)$ 、 $\omega_y(z)$ 分别为光束在 x 、 y 方向束腰和 z 处光斑的长、短半轴; α 为大气衰减系数。因 $z=0$ 处的光斑面积 $A(0) = \pi\omega_x(0)\omega_y(0)$, (1) 式变为

$$P_0 = \int_{A(0)} \frac{H_0\omega_{0x}\omega_{0y}}{\omega_x(0)\omega_y(0)} \exp\left[-\frac{2x^2}{\omega_x^2(0)} - \frac{2y^2}{\omega_y^2(0)}\right] dA(0)$$

将此式的直角坐标变换为极坐标, 经处理有

$$P_0 = (1 - e^{-2}) H_0 \omega_{0x} \omega_{0y} \int_0^{\pi/2} \frac{\omega_x(0)\omega_y(0) d\theta}{\omega_y^2(0) \cos^2\theta + \omega_x^2(0) \sin^2\theta} = \frac{e^2 - 1}{2e^2} \pi \omega_{0x} \omega_{0y} H_0$$

$$H_0 = 0.73626 P_0 / (\omega_{0x} \omega_{0y}) \quad (3)$$

代入 (2) 式, 得模拟器辐照度的空间分布:

$$H(x, y, z) = \frac{0.73626 P_0}{\omega_x(z)\omega_y(z)} \exp\left[-\frac{2x^2}{\omega_x^2(z)} - \frac{2y^2}{\omega_y^2(z)} - \alpha z\right]$$

若激光在 x - z 、 y - z 平面内的远场发散角分别为 θ_x 和 θ_y , 像散为 2ρ , 而模拟射程均在远场, 故

$$\omega_x(z) = \theta_x(z - \rho), \quad \omega_y(z) = \theta_y(z + \rho) \quad (4)$$

则

$$H(x, y, z) = \frac{0.73626 P_0}{\theta_x \theta_y (z^2 - \rho^2)} \exp\left[-\frac{2x^2}{\theta_x^2 (z - \rho)^2} - \frac{2y^2}{\theta_y^2 (z + \rho)^2} - \alpha z\right] \quad (5)$$

设探测器的阈值辐照度为 T , 当 $H(x, y, z) = T$ 时探测器可正常工作。我们将模拟器输出激光辐照度等于探测器阈值辐照度范围内的光斑定义为模拟器的阈值光斑。阈值光斑的边界方程为

$$\frac{0.73626 P_0}{\theta_x \theta_y (z^2 - \rho^2)} \exp\left[-\frac{2x^2}{\theta_x^2 (z - \rho)^2} - \frac{2y^2}{\theta_y^2 (z + \rho)^2} - \alpha z\right] = T$$

令

$$L = \sqrt{0.73626 P_0 / T} = 0.8581 \sqrt{P_0 / T}, \quad \theta = \sqrt{\theta_x \theta_y} \quad (6)$$

故

$$\frac{x^2}{\frac{1}{2} \theta_x^2 (z - \rho)^2 \left[\ln \frac{L^2}{\theta^2 (z^2 - \rho^2)} - \alpha z \right]} + \frac{y^2}{\frac{1}{2} \theta_y^2 (z + \rho)^2 \left[\ln \frac{L^2}{\theta^2 (z^2 - \rho^2)} - \alpha z \right]} = 1 \quad (7)$$

L 称为特征长度。由 (7) 式可知, 阈值光斑与其常规定义的光斑相同点是在垂直于光轴截面上的分布都是椭圆。若阈值光斑椭圆的长、短半轴分别表示为 $\omega_{Tx}(z)$ 、 $\omega_{Ty}(z)$, 显然, 由 (7) 式可知

$$\omega_{Tx}(z) = \frac{\theta_x}{\sqrt{2}} (z - \rho) \left[\ln \frac{L^2}{\theta^2 (z^2 - \rho^2)} - \alpha z \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\omega_{Ty}(z) = \frac{\theta_y}{\sqrt{2}} (z + \rho) \left[\ln \frac{L^2}{\theta^2 (z^2 - \rho^2)} - \alpha z \right]^{1/2} \quad (9)$$

将此两式同(6)式比较可知, 阈值光斑与常规光斑的区别是: 其长、短轴不是 z 的单调函数, 而随着距离 z 的增加, 起初增大, 达到一个最大值, 然后减小, 并最终趋于零。若其最大值分别在 z_x^* 和 z_y^* 处, 则 $\omega_{Tx}(z)$ 、 $\omega_{Ty}(z)$ 分别在 z_x^* 和 z_y^* 处的导数 $\omega'_{Tx}(z_x^*) = 0$, $\omega'_{Ty}(z_y^*) = 0$, 由上两式解得

$$z_x^* = \frac{L}{\theta} \left[\exp \left(-\frac{z_x^*}{z_x^* + \rho} - \frac{3}{2} \alpha z_x^* + \frac{\alpha}{2} \rho \right) + \rho^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$z_y^* = \frac{L}{\theta} \left[\exp \left(-\frac{z_y^*}{z_y^* - \rho} - \frac{3}{2} \alpha z_y^* + \frac{\alpha}{2} \rho \right) + \rho^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

上两式分别代入(8)、(9)式则得阈值光斑最大半轴

$$\omega_{Txm} = \frac{\theta_x}{\sqrt{2}} (z_x^* - \rho) \sqrt{\frac{z_x^*}{z_x^* + \rho} + \frac{1}{2} \alpha (z_x^* - \rho)} \quad (12)$$

$$\omega_{Tym} = \frac{\theta_y}{\sqrt{2}} (z_y^* + \rho) \sqrt{\frac{z_y^*}{z_y^* + \rho} + \frac{1}{2} \alpha (z_y^* - \rho)} \quad (13)$$

在阈值光斑为零处的距离 z_m 就是模拟器的最大射程, 即在 z_m 处, $A(z_m) = \pi \omega_{Tx}(z_m) \omega_{Ty}(z_m) = 0$, 将(8)、(9)式代入, 就可解得最大射程

$$z_m = \sqrt{\frac{L^2}{\theta^2} e^{-\alpha z_m} + \rho^2} \quad (14)$$

三、简化方程与迭代求解

由于半导体激光器输出椭圆高斯光束的像散比模拟射程范围约小三个量级, 故可近似认为 $z + \rho \approx z - \rho \approx z$, 则(5)式和(8)~(14)式可简化为

$$H(x, y, z) = \left(\frac{L}{\theta z} \right)^2 \exp \left[-\frac{2x^2}{\theta_x^2 z^2} - \frac{2y^2}{\theta_y^2 z^2} - \alpha z \right] \quad (15)$$

$$\omega_{Tx}(z) = \frac{\theta_x}{\sqrt{2}} z \left[2 \ln \frac{L}{\theta z} - \alpha z \right]^{1/2} \quad (16)$$

$$\omega_{Ty}(z) = \frac{\theta_y}{\theta_x} \omega_{Tx}(z) \quad (17)$$

$$z^* = z_x^* = z_y^* = \frac{L}{\theta \sqrt{e}} \exp \left(-\frac{3}{4} \alpha z^* \right) \quad (18)$$

$$\omega_{Txm} = \sqrt{\frac{\theta_x}{2\theta_y}} L \sqrt{1 + \frac{1}{2} \alpha z^*} \exp \left(-\frac{1}{2} - \frac{3}{4} \alpha z^* \right) \quad (19)$$

$$\omega_{Tym} = \frac{\theta_y}{\theta_x} \omega_{Txm} \quad (20)$$

$$z_m = \frac{L}{\theta} \exp \left(-\frac{1}{2} \alpha z_m \right) = 0.8581 \sqrt{\frac{P_0}{T \theta_x \theta_y}} \exp \left(-\frac{1}{2} \alpha z_m \right) \quad (21)$$

$$\frac{z^*}{z_m} = \frac{1}{\sqrt{e}} \exp \left(-\frac{1}{2} \alpha z_m - \frac{3}{4} \alpha z^* \right) \quad (22)$$

在真空中或忽略大气衰减时的最大射程、阈值光斑半轴和 z^* 均为最大理论值, 由上述各式得

$$z_{m0} = \frac{L}{\theta} = 0.8581 \sqrt{\frac{P_0}{T\theta_x\theta_y}} \quad (23)$$

$$\omega_{Tzm0} = \sqrt{\frac{\theta_x}{2e\theta_y}} L = 0.368 \sqrt{\frac{\theta_x P_0}{\theta_y T}} \quad (24)$$

$$\omega_{Tym0} = \frac{\theta_y}{\theta_x} \omega_{Tzm0} \quad (25)$$

$$z_0^* = z_{x0}^* = z_{y0}^* = \frac{L}{\theta\sqrt{e}} = \frac{1}{\sqrt{e}} z_{m0} = 0.6065 z_{m0} \quad (26)$$

最大射程(21)式与最大阈值光斑射程(18)式均为超越方程,可迭代求解:将 $\alpha=0$ 的(23)和(26)式作为初始近似值,而分别利用其迭代公式

$$z_{m,n+1} = \frac{L}{\theta} \exp\left(-\frac{1}{2} \alpha z_{m,n}\right) \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (27)$$

$$z_{n+1}^* = \frac{L}{\theta\sqrt{e}} \exp\left(-\frac{3}{4} \alpha z_n^*\right) \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (28)$$

就可解出所要求的 z_m 和 z^* 。迭代次数 n 必须满足相应的精度要求。现迭代求解标准天气($\alpha=0.12 \text{ km}^{-1}$)时,下面两种 $\lambda=904 \text{ nm}$ 的模拟器的最大射程:

(1) 美国的 MILES VES, $P_0=1.95 \text{ W}$, $T=7 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$, $\theta=1.2 \text{ mrad}$

(2) 国内的舰炮激光模拟器 $P_0=2.8 \text{ W}$, $T=2 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$, $\theta_x=0.8 \text{ mrad}$, $\theta_y=0.18 \text{ mrad}$ 。

误差小于千分之一的计算过程列入表 1。

Table 1 Iterative process of the maximum range (unit: m)

Nation	Name	z_{m0}	z_{m1}	z_{m2}	z_{m3}	z_{m4}	z_{m5}	z_{m6}	z_{m7}	z_{m8}	z_{m9}
U.S.	MILES VES	3774	3009	3151	3124	3129	3128				
China	Chaser simulator	8460	5092	6233	5820	5966	5914	5933	5926	5929	5928

故得 z_m 前者为 3128 m, 后者是 5928 m。当大气衰减增大时, z_m 、 z^* 将单调减小,但比值 z^*/z_m 却单调缓慢上升,利用(27)、(28)式迭代公式,求解不同能见度下国内舰炮激光模拟器 z_m 、 z^* 和 z^*/z_m 的结果列入表 2。

Table 2 z_m , z^* and z^*/z_m of laser chaser simulator versus visibility

V (km)	∞	60	40	23.5	15	10	8	5	4	3
α (km^{-1})	0	0.047	0.072	0.12	0.19	0.29	0.36	0.57	0.71	0.96
z_m (m)	8460	7151	6657	5928	5174	4442	4068	3301	2959	2521
z^* (m)	5131	4394	4109	3683	3235	2794	2566	2095	1883	1610
z^*/z_m	0.6065	0.6144	0.6172	0.6213	0.6252	0.6290	0.6308	0.6347	0.6364	0.6386

四、阈值光斑分布与消光函数

为了逼真模拟武器的有效杀伤范围,阈值光斑与距离的关系应和所模拟武器的有效杀伤

概率随距离的变化相匹配。因此,除最大射程、最大阈值光斑射程外,阈值光斑的空间形状和最大轴长也是模拟器的重要特征参数。阈值光斑的空间分布可用(16)、(17)式计算,舰炮激光模拟器在两种能见度下的计算结果列于表3。

Table 3 Space distribution of threshold beam spot of laser chaser simulator

V(km)	z(km ⁻¹)	Half axes of threshold beam	z(m)														
			200	500	1000	1250	1500	1750	2000	2300	2500	3000	3300	3600	4000	4400	5000
5	0.57	ω_{Tx}	0.307	0.655	1.088	1.247	1.369	1.454	1.494	1.480	1.423	1.023	0.080				
		ω_{Ty}	0.069	0.147	0.245	0.281	0.308	0.327	0.336	0.333	0.320	0.230	0.018				
10	0.29	ω_{Tx}	0.308	0.664	1.128	1.315	1.476	1.609	1.717	1.811	1.851	1.861	1.796	1.660	1.316	0.442	
		ω_{Ty}	0.069	0.149	0.254	0.296	0.332	0.362	0.386	0.407	0.416	0.417	0.404	0.374	0.296	0.099	
23.5	0.12	ω_{Tx}	0.309	0.669	1.152	1.355	1.536	1.698	1.840	1.985	2.068	2.221	2.276	2.453	2.283	2.197	1.901
		ω_{Ty}	0.070	0.151	0.259	0.305	0.346	0.382	0.416	0.447	0.465	0.500	0.512	0.552	0.514	0.494	0.428

由(19)、(20)式可知,阈值光斑最大轴长与 z_m 、 z^* 一样,在真空中具有最大值,在大气中随着 α 的增大而单调减小,这种激光在大气中传输受到衰减的现象称为消光效应。虽然 α 定量地描述了对 z_m 、 z^* 、 z^*/z_m 和 ω_{Tem} 等的消光衰减,但 ω_{Tem} 与 α 的关系最复杂,这是因为(19)式中的 z^* 又由与 α 有关的超越方程确定。为了简化,文献[1]引入消光参数 $J = \frac{1}{2}\alpha z^*$ 和消光函数 $F(J)$ 。 $F(J)$ 定义为阈值光斑在大气中的最大轴长与在真空里的最大轴长之比,即

$$F(J) = \omega_{Tem} / \omega_{Tem0} \quad (29)$$

由 $J = \frac{1}{2}\alpha z^*$ 和(19)、(24)、(29)式可得

$$F(J) = \sqrt{1+J} / \exp(1.5J) \quad (30)$$

文献[1]推出确定大气衰减消光效应的消光参数最终式为 $J = \frac{\alpha L}{4\theta}$,作者认为欠妥。显然,该式将 J 定义式中的 z^* 最终代以 $\frac{L}{2\theta}$,因 $\frac{L}{2\theta} = \frac{1}{2}z_{m0}$ 是在真空中最大射程的一半,与大气衰减无关,对各模拟器均为定值;而 z^* 是大气中最大阈值光斑的射程,是与大气衰减系数 α 有关的函数,因此两者不能等同,也不能相互近似代用。本文试图进行如下修正:取(18)式展开幂级数近似值,并用(23)式处理后,可确定表征大气衰减消光效应的关键性无量纲参数群 J 应为:

$$J = \frac{1}{4}\alpha z_{m0} \exp\left(-\frac{\alpha z_{m0}}{2 + \alpha z_{m0}}\right) \\ = 0.2145\alpha \sqrt{\frac{P_0}{T\theta_x\theta_y}} \exp\left(-\frac{0.8581\alpha \sqrt{\frac{P_0}{T\theta_x\theta_y}}}{2 + 0.8581\alpha \sqrt{\frac{P_0}{T\theta_x\theta_y}}}\right) \quad (31)$$

由(29)、(19)、(20)与(6)式可得模拟器的阈值光斑在各种大气能见度条件下的最大半轴长度

$$\omega_{Tem} = 0.368 \sqrt{\frac{\theta_x P_0}{\theta_y T}} F(J) \quad (32)$$

$$\omega_{Tym} = 0.368 \sqrt{\frac{\theta_y P_0}{\theta_x T}} F(J) = \frac{\theta_y}{\theta_x} \omega_{Txm} \quad (33)$$

已知上述舰炮激光模拟器的 P_0 、 T 、 θ_x 和 θ_y ，由(24)、(25)式可算得阈值光斑在真空中的最大半轴 $\omega_{Txm0} = 2.903$ m, $\omega_{Tym0} = 0.653$ m, 而在各种大气能见度环境中的最大半轴, 可用(31)式解出 J , (30)式确定 $F(J)$, 再用上两式求得结果; 同时又用文献[1]的公式进行了类似计算。现将这两种结果列入表4。比较两种结果可知: 文献[1]将 J 式中 α 的函数 z^* 代以常数 $\frac{1}{2} z_{m0}$, 仅认为 $J \propto \alpha$, 这就使得随着 α 的增大, J 的增长加快, $F(J)$ 的下降加速, 阈值光斑的衰减加剧, 特别是在 α 较大的一般天候, 情况更为严重, 故 J 式应修正为(31)式。

Table 4 The comparison of two kinds of calculated results of extinction function and the maximum axes

V (km)	∞	60	40	23.5	15	10	8	5	4	3	
α (km ⁻¹)	0	0.047	0.072	0.12	0.19	0.29	0.36	0.57	0.71	0.96	
J	By equation $\alpha/4 z_{m0}$ of ref. [1]	0	0.1988	0.3046	0.5076	0.8037	1.2267	1.5228	2.4111	3.0033	4.0608
	By equation (31) of this text	0	0.0842	0.1206	0.1812	0.2574	0.3536	0.4164	0.5964	0.7092	0.9101
$F(J)$	By equation of ref. [1]	1.000	0.8059	0.7233	0.5734	0.4023	0.2370	0.1618	0.0496	0.0221	0.0051
	By equation (30) of this text	1.000	0.9177	0.8834	0.8281	0.7622	0.6845	0.6373	0.5176	0.4512	0.3529
ω_{Txm} (m)	By equation of ref. [1]	2.903	2.340	2.100	1.665	1.168	0.688	0.470	0.144	0.064	0.015
	By equation(32) of this text	2.903	2.664	2.565	2.404	2.213	1.987	1.850	1.503	1.310	1.024
ω_{Tym} (m)	By equation of ref. [1]	0.653	0.526	0.472	0.374	0.263	0.155	0.106	0.032	0.014	0.003
	By equation(33) of this text	0.653	0.599	0.577	0.541	0.498	0.447	0.416	0.338	0.295	0.230

上述舰炮模拟器特征参数与能见度关系的本文计算值如图1所示。

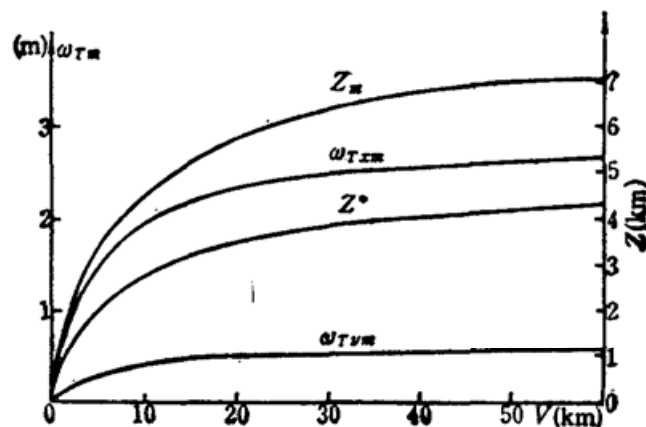


Fig. 1 Characteristic parameters of laser chaser simulator versus visibility

五、实验结果

上述舰炮模拟器阈值光斑的空间分布在某机场跑道 2.3km 范围内进行了实测,并实测了它的最大射程。现选部分实测结果列入表 5、表 6。表 6 还列入了本舰炮模拟器最大射程的本文和文献[1]的计算值。文献[1]定义发散角的光斑直径异于一般,是取用照度降为中心最大照度的 10% 处的光斑尺寸,因文献[1]中均为圆形高斯光束计算式,式中发散角 θ' 的选取作者

Table 5 Tested results of distribution of threshold beam spot

V (km)	α (km ⁻¹)	Half axes of threshold beam spot (m)	z (m)							
			200	500	1000	1250	1500	1750	2000	2300
5	0.57	$2\omega_{Tx}$	0.55	0.85	1.50	1.70	2.20	2.70	2.90	2.70
		$2\omega_{Ty}$	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.58	0.62	0.60
10	0.29	$2\omega_{Tx}$	0.60	1.10	1.80	2.30	2.50	2.80	3.30	3.70
		$2\omega_{Ty}$	0.40	0.50	0.58	0.60	0.64	0.66	0.70	0.75

Table 6 Experimental and calculated values of the maximum range

V (km)	$z_{m,exp}$ (m)	$z_{m,calc}$ (m)		
		By equation of ref. [1]		By equation (27) of this text
		I. $\theta' = \theta'_x$	II. $\theta' = \sqrt{\theta'_x \theta'_y}$	
30	6090	3218	5914	6278
15	5190	2856	4910	5174

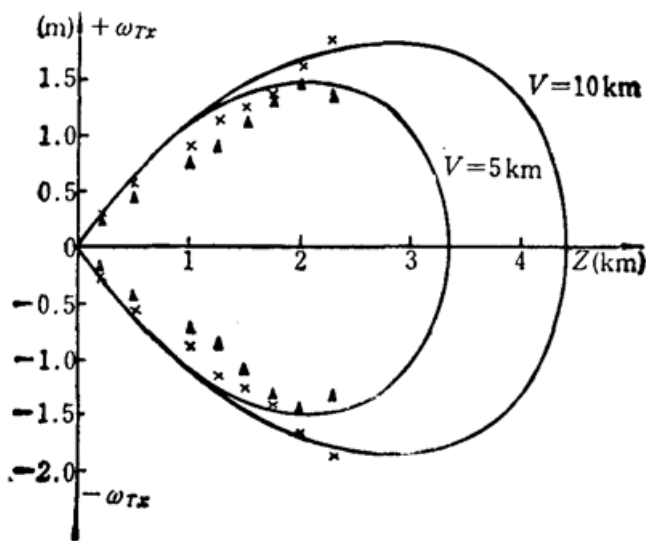


Fig. 2 $2\omega_{Tx}$ versus the range
 —calculated theoretical curves
 ×—V=10 km experimental points
 ▲—V=5 km experimental points

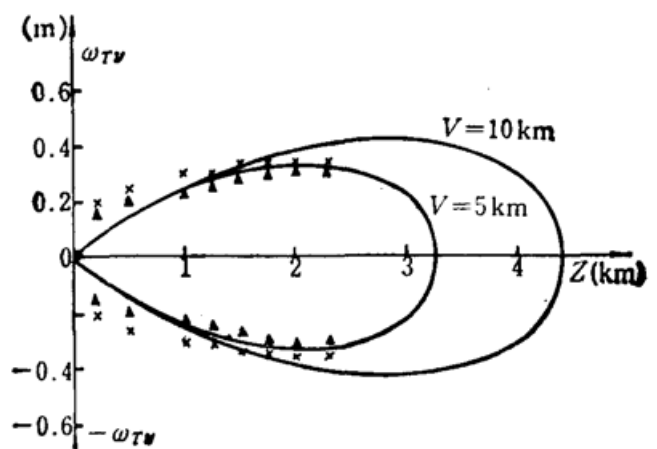


Fig. 3 $2\omega_{Ty}$ versus the range
 —calculated theoretical curves
 ×—V=10 km experimental points
 ▲—V=5 km experimental points

分为两种情况: I. 国内外多取用水平发散角, 即 $\theta' = \theta'_x$ (因 θ'_y 甚小); II. 作者为了较准地利用文献[1], 将椭圆高斯光束等效圆形化, 取用两垂直方向发散角的均方根, $\theta' = \sqrt{\theta'_x \theta'_y}$ 。即使如此, 还是本文公式较合理。现将阈值光斑空间分布的实验值与本文理论计算值绘于图 2~3。由图 2~3 和表 5~6 可知, 利用本文的简化传输方程计算舰炮激光模拟器特征参数的理论值与实验结果基本一致, 说明本文从椭圆高斯光束传输理论所导出的有关阈值光斑和消光函数的修正公式是正确的。

六、结 论

1. 激光武器模拟器阈值光斑的最大轴长, 与激光输出功率和探测器阈值辐照度比值的平方根成正比, 还与同方向和垂直方向的发散角比值的平方根成正比。

2. 若模拟器光源输出圆形高斯光束 ($\theta_x = \theta_y$), 则阈值光斑最大直径完全不受激光装置的影响。而对于国内外实际使用半导体激光器输出的具有像散的椭圆高斯光束, 由于阈值光斑最大轴长与同方向和垂直方向的激光发散角比值的平方根成正比, 因此, 可以通过精心设计天线透镜参数和微调透镜位置来控制 and 调整 θ_x 和 θ_y , 以改变阈值光斑两垂直方向最大轴长的大小和比例, 满足所模拟武器的战术性能的要求。

3. 阈值光斑最大轴长随大气衰减增大而减小的函数由无量纲消光参数 J 单值地确定, 而 J 本身又是激光输出功率、两方向发散角、探测器阈值辐照度与大气衰减系数的函数。

4. 最大射程与激光输出功率和探测器阈值辐照度比值的平方根成正比, 又与两互相垂直方向的激光发散角乘积的平方根成反比。

5. 最大阈值光斑射程和最大射程, 两者都随大气衰减的增大而减小, 但两者的比值却缓慢上升, 在真空中约为 61%, 在标准天气约为 62%, $V = 8 \sim 10$ km 时约 63%, 而舰炮射程约束能见度 3 km (因小于 3 km 时无法看到目标) 时约 64%。

叶平贤教授对本文给予了有益指导, 易前长、王江安、乐元川、李树山、玄兆林、李庆民、陈菊秋提供了有效帮助, 彭武荣、刘启忠、张静远和张晓峰等同志多次参加了机场实验工作, 在此特表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 ADA102276, Appendix B.
- 2 A. Yariv, Optical Electronics, 1985, 47—50.
- 3 魏光辉 *et al.*, 激光束光学, 北京工业学院出版社, 1988