

激光测距仪信噪比的研究

方启万 江传富 殷志祥 陈腾斌

(海军工程学院 505 室, 武汉 430033)

吴惠春 王吉忠 许中胜

(驻某单位军事代表室)

提要 根据激光传输与探测理论, 导出激光测距仪信噪比简化公式, 修正了 Laser Handbook 简化方程, 进行了实验验证。

关键词 信噪比, 消光检验

1 信噪比与三种探测功率

激光测距仪探测器在光电转换中, 在给出被测激光回波信号的同时也给出噪声, 即使遮断回波, 仍有噪声输出。为描述噪声对探测灵敏度的限制, 人们引入噪声等效功率 NEP 来表征探测器的最小探测功率 P_{\min} , 其定义是: 使视放输出的信噪比 $SNR = I_s/I_n = 1$ 时的入射功率。这里 I_s 为视放输出的信号电流峰值振幅, I_n 为视放输出的噪声电流均方根值。

作者认为: 把信噪比等于 1 作为发现信号的条件, 认定 NEP 为最小探测功率 P_{\min} 欠妥, 它混淆了三种信噪比对应的三种探测功率。因实际的激光测距仪绝对不能探测 NEP, 不然, 阈值电流 I_s 必须等于噪声电流 I_n , 即 $SNR = I_s/I_n = I_n/I_n = 1$, 导致虚警概率太高, 根本无法实际使用, 实例如下:

假定激光测距仪用的激光脉宽 $\tau = 10$ ns, 最大测程 $R_{\max} = 10$ km, 为达到 1% 虚警概率 PFA 和 99% 的探测概率 P_d , 下面计算要求的阈噪比和最小信噪比。

文献[1] 给出的计算方法: 为测 10 km 距离, 测距机在 $2R_{\max}/C = 67$ μ s (C 为光速) 时间内必须选通开启。由 $PFA = 1\%$, 则平均虚警率 \overline{FAR} 由 100 个 67 μ s 间隔中发生一次来确定:

$$\overline{FAR} = \frac{PFA}{2R_{\max}/C} \quad (1)$$

由(1)式算得 $\overline{FAR} = 150$ Hz, 用公式

$$\overline{FAR} = \frac{1}{2\sqrt{3}\tau} \exp\left(-\frac{I_s^2}{2I_n^2}\right) \quad (2)$$

解得 $I_s/I_n = 4.93$ 。由 $\tau(\overline{FAR}) = 1.5 \times 10^{-6}$ 和 $P_d = 99\%$ 查文献[1] 的图 8-3 得最小信噪比 $(I_s/I_n)_{\min} = 7.3$ 。

但是, 若 $I_s/I_n = 1$, 则由(2)式得 $\overline{FAR} = 17.5$ MHz, 再用(1)式得 $PFA = 1172.5$, 说明测距一次, 虚警 1172.5 次。因此, 此种测距仪在实用上毫无意义。

另外, 若 $(I_s/I_n)_{\min} = I_n/I_n$, 则 $P_d = 50\%$ ^[1], 也不能用。

综上所述, $I_r/I_s = 1$ 时的入射功率应称为极限探测功率 $P_{r\text{limit}}^{[2]}$; $I_s/I_s = I_r/I_s$ 时的入射功率是实际的最小探测功率, 但为避免混淆并使含意更贴切, 应称为阈值探测功率 P_{rt} ; 为满足探测概率指标需要的最小信噪比对应的入射功率应称为最小信噪比探测功率 $P_{r\text{min}}$ 。

2 消光检验与简化方程的困惑

研制与生产激光测距仪的探测功率 P_r , 在指标规定的测程范围内, 都必须满足测距方程

$$P_r = \frac{4P_t K_t K_r A_r \sigma \rho}{\pi^2 \theta^2 R^4} e^{-2\alpha R} \quad (3)$$

测程 R 愈大, P_r 愈小。 $R = R_{\text{max}}$ 时, P_r 的下限应是 $P_{r\text{min}}$, 即在 R_{max} 上也要保证探测概率, 故

$$P_{r\text{min}} = \frac{4P_t K_t K_r A_r \sigma \rho}{\pi^2 \theta^2 R_{\text{max}}^4} e^{-2\alpha R_{\text{max}}} \quad (4)$$

检验 R_{max} 上的 $P_{r\text{min}}$, 承制方均不用实测法而用模拟法: 对 R_{max} 处军方认可的模拟目标或靶标测距。但中远程测距仪难以实现, 如生产 $R_{\text{max}} = 30 \text{ km}$ 产品的厂内最高直视距离仅几公里, 无法在 30 km 处竖可见靶; 山区云务缭绕, 一般能见距离 $V = 3 \sim 5 \text{ km}$, 就看不到远处目标; 即使近程测距仪也深受地理和气候的严重影响。

而消光法能简便定量地考核产品满足规定探测概率的最大测距能力, 排除地理、气候与目标特性等外因影响, 且原理简单, 由(4)式得

$$\frac{P_t K_t}{P_{r\text{min}}/(K_r A_r)} = \frac{\pi^2 \theta^2 R_{\text{max}}^4}{4\sigma \rho} e^{2\alpha R_{\text{max}}} \quad (5)$$

此式左边各因子均为机内参数, 分子是发射机输出激光功率, 分母是进入接收机单位面积的最小信噪比探测功率。比值愈大, 灵敏度就愈高, 故比值反映产品的综合测距能力; 右边各因子皆为机外参数, 分子为往返传输衰减和回波漫射范围损耗因子, 分母的倒数为目标反射损耗, 故此比值反映目标、大气和测程要求产品应具有的综合测距能力。消光检验是将产品对 R_{max} 处、反射率 ρ 和面积 σ 目标的测距换成对 $R_0 = 500 \text{ m}$ 处、 $\rho_0 = 0.85$ 大目标靶的测距, 同时在发射或接收光路不断插入定标衰减片, 当刚好满足探测概率指标时, 插入衰减片的最大分贝数 N 就是该产品的消光比。对大目标消光靶面积 $\sigma > \pi^2 \theta^2 R_{\text{max}}^2/4$, 则 $4\sigma/\pi^2 \theta^2 R_{\text{max}}^2 = 1$, 故(5)式可变为

$$10 \lg \frac{P_t K_t}{P_{r\text{min}}/(K_r A_r)} = 10 \lg \frac{\pi R_0^2}{\rho_0} e^{2\alpha R_0} + N \quad (6)$$

$V = 34 \text{ km}$ 时, 算得右边第一项为 60 dB , $V = 10 \sim 60 \text{ km}$ 内变化时, 其误差小于 0.83 dB , 故一般大气影响可忽略。左边称为产品系统灵敏度 S , 它用 60 dB 进行规定探测概率(如 100 次测准 99 次)的消光测距, 剩余的分贝数就是插入消光比 N , $N = S - 60 \text{ (dB)}$ 。对四种(其中一种进口)型号产品进行消光检验的结果与文献[3]信噪比简化公式(14)不符, (14)式为

$$SNR \equiv \frac{I_r}{I_s} \equiv \frac{P_r q e/hf}{\sqrt{2eBF_m P_s q e/hf}} \quad (7)$$

对 $(SNR)_{\text{min}}$, 并将 I_r, I_s, q 换成通用符号, 则

$$(SNR)_{\text{min}} \equiv \left(\frac{I_s}{I_r} \right)_{\text{min}} \equiv \frac{P_{r\text{min}} \eta e/hf}{\sqrt{2eBF_m P_s \eta e/hf}} \quad (8)$$

每台产品进行同一探测概率的两种消光检验, 因 $P_{d1} = P_{d2}$, 则 $(SNR)_{\text{min}1} = (SNR)_{\text{min}2}$, 但使 $P_{b2} = 10^{-4} \sim 10^{-7} P_{b1}$, 而实验结果是 $N_2 \approx N_1$, 说明 $P_{r\text{min}2} \approx P_{r\text{min}1}$, 与(8)式矛盾。

3 噪声分析与简化方程的修正

总噪声电流

$$I_n = \sqrt{\frac{4KTBF_r}{r} + 2eM^2BF_m \left(\frac{P_r \eta e}{hf} + \frac{P_b \eta e}{hf} + I_d \right)} \quad (9)$$

第一项热噪声来源于电阻内部电荷载流子不规则热骚动, 式中 K 为波尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T 为探测器温度 (取 $T = 300 \text{ K}$), 实验四型 (A, B, C, D) 产品的其它参数差别不大, 取接收机带宽 $B = 18 \text{ MHz}$, 等效负载电阻 $r = 600 \Omega$, 视放噪声系数 $F_r = 3$, 估算出四机型热噪声均方值 $I_{nT}^2 = 4KTBF_r/r = 1.49 \times 10^{-15} \text{ A}^2$ 。

第二项信号噪声由信号光子载流子的粒子性引起, 且顽固地附在信号上。信号光子流与探测器表面相互作用时间虽很短, 但较光频周期却很长, 每瞬间收到的信号光子数围绕统计平均值无规则起伏, 在信号中产生光频段噪声, 故又称为量子噪声。式中 $\eta e/hf$ 是光功率转换成光电流的光电转换因子, e 为电子电荷 ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), h 为普朗克常数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), f 为入射光频 ($\lambda = 1.064 \mu\text{m}$), 量子效率 $\eta = 0.18$, P_r 是入射信号功率, F_m 是与雪崩倍增过程有关的噪声系数, 由文献[4]

$$F_m = 0.98(2 - 1/M) + 0.02M \quad (10)$$

取电子倍增系数 $M = 80$, 则 $F_m = 3.55$ 。由消光检验测得四机型的 $P_{r\min}$ 大致相当, 现用 B 型机的算式

$$P_{r\min} B = \frac{1}{4R_0^2} P_{tB} K_{tB} 10^{N_B/10} K_{rB} d_{rB}^2 \rho_0 \exp(-2\alpha R_0) \quad (11)$$

由激光器输出功率 $P_{tB} = 0.8 \text{ MW}$, 发射光学透过率 $K_{tB} = 0.8$, 接收光学透过率 $K_{rB} = 0.4$, d_{rB} 为接收系统通光孔径, $d_{rB}^2 10^{N_B/10}/4 = 12.64911$, 其余参数同前, 用(11)式估算得 $P_{r\min} \approx P_{r\min B} = 3 \times 10^{-8} \text{ W}$, 故信号噪声均方值 $I_{n\min}^2 = 6.0673 \times 10^{-16} \text{ A}^2$ 。

第三项为背景噪声, 来自对太阳光的反射和散射。目标对太阳光的反射见图 1。设目标漫反射系数为 ρ , 太阳光谱照度为 H_λ , 滤光镜带宽为 $\Delta\lambda$ 。利用朗伯定律得

$$P_{b1} = \frac{\pi}{16} K_r \Delta\lambda \theta_r^2 d_r^2 H_\lambda \rho \cos\theta \cos\varphi e^{-\alpha R}$$

考虑最严重的情况, 取 $\theta = \varphi = 0$, 则上式为

$$P_{b1} = \frac{\pi}{16} K_r \Delta\lambda \theta_r^2 d_r^2 H_\lambda \rho e^{-\alpha R} \quad (12)$$

太阳光的大气散射可由大气传输效应并在信号行程上积分[3], 得

$$P_{b2} = \frac{\pi}{64} K_r \Delta\lambda \theta_r^2 d_r^2 H_\lambda \frac{\beta}{\alpha} (1 - e^{-\alpha R}) \quad (13)$$

式中 β 为积分体散系数。故总入射背景功率

$$P_b = \frac{\pi}{16} K_r \Delta\lambda \theta_r^2 d_r^2 H_\lambda [\rho e^{-\alpha R} + (\beta/4\alpha)(1 - e^{-\alpha R})] \quad (14)$$

四种产品中取最小和最大的接收孔径来估算 P_b : $d_{rA} = 4 \text{ cm}$, $d_{rD} = 14 \text{ cm}$, $K_r = 0.4$, $\Delta\lambda = 10$

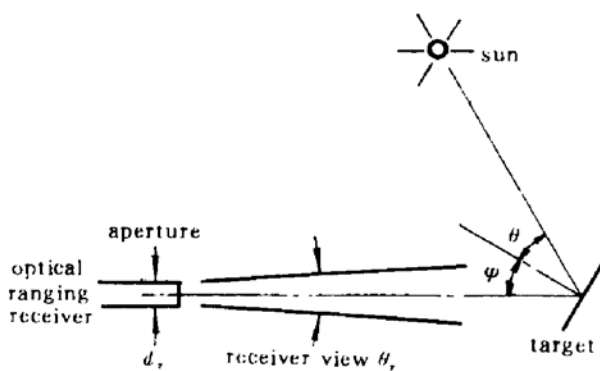


Fig. 1 Geometry for calculating background photon flux due to solar irradiation

nm, 对 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $H_\lambda = 5.4 \times 10^{-5} \text{W/cm}^2 \cdot \text{nm}$, $R_A = 10 \text{ km}$, $V_A = 20 \text{ km}$, $R_D = 30 \text{ km}$, $V_D = 30 \text{ km}$, 取 $\rho = 0.4$, 对均匀大气 $\alpha = \beta$, 代入(14)式得 $P_{bA} = 1.9656 \times 10^{-10}$, $P_{bD} = 2.16 \times 10^{-9}$, 代入背景噪声项得

$$I_{bA}^2 = 3.9653 \times 10^{-18} \text{ A}^2, \quad I_{bD}^2 = 4.3675 \times 10^{-17} \text{ A}^2$$

第四项为暗电流噪声, 体漏电流典型值^[4]为 10^{-10} A/mm^2 , 探测器面积为 $0.5 \sim 0.8 \text{ mm}^2$, 故 $I_d = (0.5 \sim 0.8) \times 10^{-10} \text{ A}$, 代入第四项得 $I_d^2 = 6.5434 \times 10^{-18} \sim 1.0469 \times 10^{-17} \text{ A}^2$.

综上所述, 总噪声 1~4 项的量级分别为 10^{-15} , 10^{-16} , $10^{-17} \sim 10^{-18}$ 与 $10^{-17} \sim 10^{-18}$, 故忽略后两项, 则(8)式修正为

$$(SNR)_{\min} \equiv \frac{M(P_{\min}\eta e/hf)}{\sqrt{\frac{4KTBF_r}{r} + 2eM^2BF_m \frac{P_{\min}\eta e}{hf}}} \quad (15)$$

因此文献[3]的信噪比简化方程(14)式应修正为

$$SNR \equiv \frac{I_s}{I_n} \equiv \frac{M(P_r\eta e/hf)}{\sqrt{\frac{4KTBF_r}{r} + 2eM^2BF_m \frac{P_r\eta e}{hf}}} \quad (16)$$

SNR 随 P_r 增大而增大, 但 I_n^2 也随之增大, 甚至可比 I_s^2 大四个量级, 故文献[3]忽略 I_n^2 欠妥。

4 实验结果

对四种机型进行了两种背景功率对比的消光检验: 有背景源太阳光的晴天和不见太阳光的阴天或日落后的黄昏的对比; 将消光衰减插入接收光路使 P_b 衰减 $N \text{ dB}$ 和插入发射光路不衰减 P_b 的对比。部分实测结果列入表 1 和表 2, 表中 A, B, C, D 各为某固定 dB 值。消光实验条件: $R_0 = 500 \text{ m}$, 消光靶面 $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$, 靶面漫反射系数 $\rho_0 = 0.85$, 各机型都保持其相应指标规定的探测概率不变, 即其最小信噪比不变。由两表可知: 无论是有或无背景辐射源太阳的照射, 还是两背景功率相差 4~7 个量级, 每台产品的消光比均无明显变化, 说明 P_b 对 SNR 没有什么影响, 故文献[3]中的(14)式应修正为本文的(16)式。

Table 1 Extinction test value for D type

Round		1	2	3	4	5
V (km)		1.5	3	8	5	3
Weather or time		thin fog	haze	light haze	light haze	haze
Type	Inserted attenuation	N (dB)				
D_1	In transmitted beam	$D - 0.10$	$D + 0.62$	$D + 1.12$	$D + 0.62$	$D - 0.10$
D_2		$D + 1.65$	$D + 1.65$	$D + 1.65$	$D + 1.12$	$D + 1.65$
D_3		$D - 4.58$	$D - 5.16$	$D - 3.85$	$D - 4.58$	$D - 3.85$
Round		6	7	8	9	10
V (km)		10	10	15	15	2
Weather or time		clear	clear	clear	clear	8 P. M.
Type	Inserted attenuation	N (dB)				
D_1	In transmitted beam	$D + 0.62$	$D - 0.10$	$D + 0.62$	$D + 0.62$	$D + 0.62$
D_2		$D + 1.65$	$D + 2.05$	$D + 1.65$	$D + 2.02$	$D + 2.02$
D_3		$D - 3.85$	$D - 4.58$	$D - 3.85$	$D - 3.85$	$D - 3.85$

Table 2 Extinction test value for A and B type

Round		1	2	3	4	5	
V (km)		10	8	1.5	3	3	
Weather on time		clear	light haze	thin fog	haze	haze	
Type	Inserted attenuation	N (dB)					
A ₁	In transmitted beam	A+1.43	A+1.52	A-0.36	A+0.56	A+1.43	
	In received beam	A+1.70	A+2.10	A+0.53	A-0.82	A+0.51	
A ₂	In transmitted beam	A-0.06	A+0.76	A-1.22	A-0.04	A-1.14	
	In received beam	A-0.57	A+0.53	A-1.29	A-0.86	A-0.85	
B ₁	In transmitted beam	B+0.58	B+0.80	B+2.71	B+1.89	B+0.72	
	In received beam	B+0.65	B+2.18	B+1.13	B+2.18	B+0.65	
B ₂	In transmitted beam	B+0.49	B+0.89	B-0.14	B+0.64	B+0.69	
	In received beam	B-0.47	B+0.18	B+0.65	B+0.65	B-0.47	
Round		6	7	8	9	10	
V (km)		5	3	8	15	15	
Weather on time		light haze	haze	light	clear	clear	
Type	Inserted attenuation	N (dB)					
A ₁	In transmitted beam	A+0.56	A+1.30	A-0.13	A-0.24	A-0.28	A+0.58
	In received beam	A+0.45	A+1.33	A-0.86	A+0.49	A-0.53	A+0.49
A ₂	In transmitted beam	A-0.32	A-1.32	A-0.45	A-1.47	A-1.26	A-0.65
	In received beam	A+0.53	A-1.29	A-0.25	A+0.18	A+0.40	A-0.35
B ₁	In transmitted beam	B+0.52	B+0.89	B-0.11	B+0.69	B-0.08	B+0.86
	In received beam	B+0.65	B+1.65	B+0.55	B+0.95	B+1.13	B+1.17
B ₂	In transmitted beam	B+0.39	B+0.99	B+0.59	B-0.09	B-0.14	B+0.43
	In received beam	B+1.13	B+0.35	B-0.20	B-0.44	B+0.65	B+0.20

致谢 胡继先高级工程师对本文给予了有益指导和有效帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 RCA, Electro-Optics Handbook, RCA corporation (1974)
- 2 A. Yariv. Introduction to Optical Electronics, Second Edition, 1976, 272~276
- 3 F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois. *Laser Handbook*, 1972, 2: 1756~1788
- 4 H. N. Burns, C. G. Christodoulou et al. *Optical Engineering*, 1991, 30(3): 323~328

Study of Signal to Noise Ratio for Laser Rangefinder

Fang Qiwan Jiang Zhuanfu Ying Zhixiang Chen Tengbin

(Naval Academy of Engineering, Wuhan 430033)

Wu Huichun Wang Jizhong Xu Zhongsheng

(Military Permanent Representative Office at a Certain Unit.)

Abstract Based on the transmission and detection theory, a simplified equation of the signal to noise ratio for laser rangefinder was derived, which modified the equation in laser handbook, and the verification tests were made.

Key words signal to noise ratio, extinction test