

目标形状对激光测距机测距能力影响的数值模拟研究

王秀生 牛燕雄 张鹏 段晓峰

(军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要 根据激光测距方程,引入了等效散射面积的概念,分别建立了对点目标、扩展目标和线形目标测距的理论模型。通过数值计算,研究了目标距离、束散角与探测器接收功率及信噪比的函数关系,讨论了不同目标形状对激光测距性能的影响。结果表明,目标形状在较近距离情况下对测距机的接收功率和信噪比有显著影响,而在较远距离时,其影响可忽略。

关键词 激光测距机 目标形状 测距性能 数值模拟

Numerical Simulation about Effect of Target Shape on Laser Range Finder's Ranging Performances

WANG Xiusheng NIU Yanxiong ZHANG Peng DUAN Xiaofeng

(Optics & Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

Abstract The theoretical models of point target, extended target and line target are established based on the concept of equivalent scattering area and laser ranging equation. The received power and signal-to-noise ratio(SNR) of Laser Range Finder (LRF) detector as a function of the target distance and divergence of the beam are simulated, and the effect of different target shape on LRF's ranging performances is discussed. The results show that the target shape can affect the ranging performance evidently relatively near, but it can be ignored in far distance.

Key words laser range finder target shape ranging performance numerical simulation

1 引言

激光测距是激光应用领域中最早、最成熟的技术之一,在军事、航天、大地测绘、工程建设等方面都有着广泛的应用和深入的研究^[1-5]。目前美国等发达国家已经发展出了第四代激光测距机,在测距性能和肉眼安全等方面有了很大的改进^[6]。

激光测距理论已经得到了较系统和全面地研究,并在实际应用中得到了检验。但是,过去的研究主要集中在激光大气传输、激光器的改进以及探测器本身的性能等方面^[7-9],而有关目标形状对测距性能的影响却少见有研究。

本文重点讨论被测目标的形状特性对激光测距性能的影响。在

建立点目标、扩展目标和线形目标的理论模型过程中,引入了等效散射面积的概念,推导出三种目标形状对于探测功率和信噪比影响的表达式,并在此基础上进行了数值模拟。结果表明,目标形状在较近距离情况下对测距机的接收功率和信噪比有显著影响,而在较远距离情况下其影响可以忽略。

2 基本概念和公式

2.1 测距方程

脉冲式激光测距机测距时,向被测目标发射一束激光,用光电探测器接收被目标反射的回波信号,通过计算脉冲的往返飞行时间得出目标的距离。对于各向同性的理想漫反射

目标,光电探测器接收到的目标反向散射功率用下式表达^[10]

$$P_r = \sigma \left(\frac{P_t}{R^2 \omega_t} \right) \left(\frac{A_c}{R^2 \omega_r} \right) (T_2^2 T_1) \quad (1)$$

其中 P_r 为探测器接收到的激光反向散射功率; P_t 激光发射功率; σ 为目标的等效散射面积; A_c 为探测系统接收孔径的面积; ω_t 为发射光束的发散立体角; ω_r 为目标散射光的散射立体角; T_1 为光学系统效率; T_2 为单向传输路径的透射率。

衡量激光测距机性能指标中最重要的是最大测程,而最大测程是由既定虚警率下探测器的最小可探测功率决定的,在其他参数不变的前提下,二者为函数关系,可通过讨论最小可探测功率而得到

收稿日期: 2005-03-21; 收到修改稿日期: 2005-06-07

作者简介: 王秀生(1975~),男,在读硕士研究生,目前主要从事脉冲测距技术的研究。

最大测程的情况。

2.2 等效散射面积

标定激光测距机时往往选用理想的散射体作为被测目标,其大小、散射系数、外形尺寸、散射面与入射光的角度、背景条件等是测试者选定的符合测试条件的理想目标。但在实际应用中,上述因素是复杂多变的。为方便讨论,我们引入等效散射面积 σ , 因为实际被测目标的散射效果与目标散射面积、散射系数、散射面与入射光的夹角等因素有关。对于标准朗伯散射面, σ 可用下式表示^[1]:

$$\sigma = 4\rho_{2\pi} A \cos^2\theta, \quad (2)$$

其中 $\rho_{2\pi}$ 为方向-半球反射系数; A 为目标的面积; θ 为反射光线与反射面的夹角。 σ 是由被测目标散射面积的大小、反射性质和探测器与散射面的相对位置决定的一个物理量, 具有面积的量纲, 它的大小表征截取发射机发射功率的多少。与目标本身的面积相比, 等效散射面积更能反映目标对入射激光的散射能力, 在理论上更接近实际。

当研究激光测距时, 一般假设被测目标的反射面为郎伯(Lambert)反射面。在探测距离上按照目标相对于衍射光斑的大小可分为三类^[10]: 第一类目标是扩展目标, 其径向尺度比衍射光斑大很多; 第二类目标是点目标, 点目标是能被光斑覆盖的目标; 第三类目标是线形目标, 线形目标是指目标在某一方向上小于光斑尺度, 而在另一方向上大于光斑尺度(如图 1 所示)。

对于点目标来说, 可以用目标的散射截面来表征其目标特性; 而对于扩展目标来讲, 由于光斑不能充满整个目标, 只能讨论光斑的散射截面。而对于线状目标来说, 必须考虑目标在光斑的位置。

(1)对于郎伯散射点目标, 假设被均匀照射的面积为 A , 则其等效

散射面积为:

$$\begin{aligned} \sigma_{pt} &= 4\rho_{2\pi} A \cos^2\theta \\ \text{当光线垂直入射时:} \\ \sigma_{pt} &= 4\rho_{2\pi} A \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\rho_{2\pi} = \frac{\int d\phi_r}{\phi_1}$, $\int d\phi_r$ 是目标在反射方向半球空间的反射通量, ϕ_1 为总入射通量。当目标为理想朗伯体时, 反射体无吸收, 由能量守恒可知总入射功率等于总反射功率, 即 $\rho_{2\pi}=1$ 。

(2) 对于一个扩展的朗伯散射目标, 目标的面积比激光光斑的衍射面积大, 散射面的大小由激光的衍射面积来决定。设激光的衍射极限角 θ_i , 在距激光测距机 R 处, 光斑面积为 $\pi R^2\theta_i^2/4$, 它的等效散射面积为:

$$\begin{aligned} \sigma_{ex} &= \pi\rho_{2\pi} R^2\theta_i^2 \cos^2\theta \\ \text{当目标与入射激光垂直时:} \\ \sigma_{ex} &= \pi\rho_{2\pi} R^2\theta_i^2, \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 对于线形目标, 它的长度大于一个被照亮区域的长度, 而宽度却小于被照区域的宽度, 现考虑一个漫射的线形目标, 其直径为 d , 长度为 $R\theta_i$, θ_i 为发射激光的衍射极限角, 它的散射等效面积为:

$$\begin{aligned} \sigma_{li} &= 4\rho_{2\pi} R\theta_i d, \\ \text{根据光束发散立体角与平面角之间的关系}^{[14]}: \\ \omega &= \pi\theta^2/4 \end{aligned} \quad (5)$$

把(3)式~(5)式是代入测距方程(1), 分别得出对于点目标、扩展目标和线形目标的测距方程:

$$p_{pt} = \frac{16\rho_{2\pi} A_c T_c^2 T_r \rho_{2\pi} A}{\pi R^4 \theta_i^2 \omega_r}, \quad (6)$$

$$p_{rex} = \frac{4\rho_{2\pi} A_c T_c^2 T_r \rho_{2\pi}}{R^2 \omega_r}, \quad (7)$$

$$p_{li} = \frac{16\rho_{2\pi} A_c T_c^2 T_r \rho_{2\pi} d}{R^3 \pi \theta_i \omega_r}, \quad (8)$$

由以上表达式可以看出: 对于点目标、扩展目标和线形目标, 探测器接收功率分别与目标距离的四次方、两次方和三次方成反比。

2.3 合作目标的情况

理想的合作目标将入射的激光束无损失的反射回来, 同时也不会改变激光束的性质。在测距方程(1)中, $p/(R^2\omega_i)$ 表示发射的光束在目标处扩散面积上的光能量的平均值; $A_c/(R^2\omega_r)$ 表示探测器接收天线与目标散射光面积的比; $T_c T_r$ 表示在传输路径上的衰减系数; σ 表示目标截取发射机发射功率的本领。对于理想朗伯体的目标, 散射空间是半球空间。即 $\omega_i=2\pi$ 。对于理想合作目标, 由于反射后不改变光束的性质, 即 $\omega_r=\omega_i$ 。反射后能量集中并按入射方向返回。从中可以看出, 起决定作用的是合作目标能够向入射方向反射光束而不是散射, 保证了光束能量的集中。目标大小和形状可以不予考虑。

3 数值模拟

3.1 对探测功率影响的数值模拟

假设大气对激光的衰减系数为 0.1dB/km, 做这样的假设是出于把目标的性质作为研究重点的考虑。目标的大小是与激光光斑的大小相比较而言。设激光束发散角 ω_i 为 1mrad, 目标直径 R 为 2m, 那么目标距离 R 在 2km 以外时, 即可作为点目标来处理。同样线形目标的直



图 1 三种形状目标示意图

径设 d 为 0.4m, 在 $R > 2\text{km}$ 处, 与激光光斑直径相差 5 倍以上, 可以作为线形目标来处理。从(6)式、(8)式可以看出, 探测功率还与激光束散角 θ_r 有关, 把它作为一个参数讨论。方便起见, 把探测器接收功率归一化 (图 2)。设激光束散角 θ_r 在 1~1.8mrad 之间变化, 做出探测功率随目标距离和激光束散角的变化曲线(如图 3、图 4)。

3.2 对信噪比影响的数值模拟

信噪比(SNR)的定义式为^[11]

$$\text{SNR} = \bar{i}_s^2 / (\bar{i}_{\text{SN}}^2 + \bar{i}_{\text{Th}}^2 + \bar{i}_{\text{Bk}}^2 + \bar{i}_{\text{Dk}}^2), \quad (9)$$

式中 \bar{i}_s 是信号电流的均方值; \bar{i}_{SN}^2 是散弹噪声电流的均方值; \bar{i}_{Th}^2 是热噪声电流的均方值; \bar{i}_{Bk}^2 是背景噪声电流的均方值; \bar{i}_{Dk}^2 是暗电流的均方值。

从背景收集到的光子或辐射的能量引起探测器载流子激发的数量起伏和浓度的随机变化, 引发了散弹噪声。背景噪声电流的均方值为

$$\bar{i}_{\text{Bk}}^2 = 2eP_{\text{Bk}}R_iB, \quad (10)$$

式中 e 为电子电荷(C), P_{Bk} 为背景光功率(W), R_i 是电流相应度(A/W), B 为电子带宽(Hz)。同样, 随机进入探测器的信号光子引起探测器输出的散弹噪声电流为

$$\bar{i}_{\text{SN}}^2 = 2eP_sR_iBG^2, \quad (11)$$

式中 G 为探测器增益。

探测器暗电流

$$\bar{i}_{\text{Dk}}^2 = 2eI_{\text{Dk}}B, \quad (12)$$

热噪声电流

$$\bar{i}_{\text{Th}}^2 = 4kTBNF/R_L, \quad (13)$$

式中 NF 为接收机的噪声系数, R_L 为探测器的等效负载电阻。

信号电流为

$$i_s = \eta_D e P_r G / (h\nu), \quad (14)$$

式中 η_D 是探测器的量子效率。把

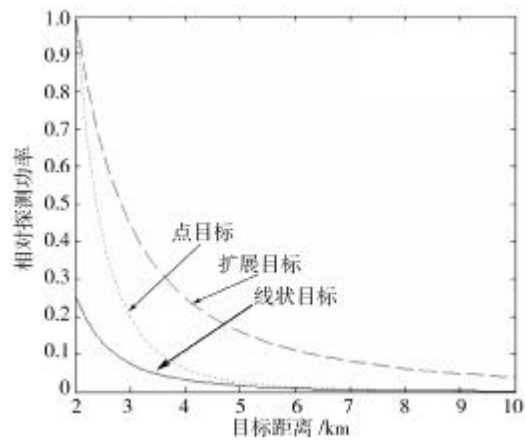


图 2 三种目标下探测功率随目标距离的变化

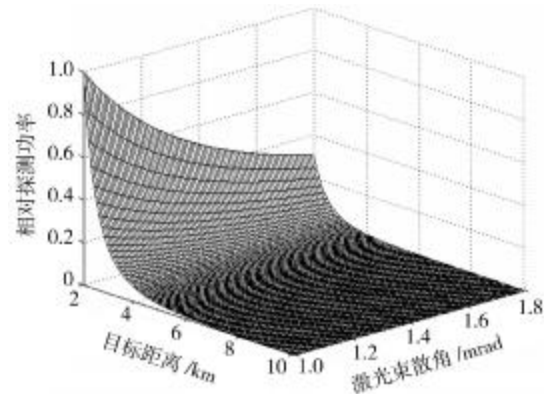


图 3 点目标时探测功率随目标距离和束散角的变化

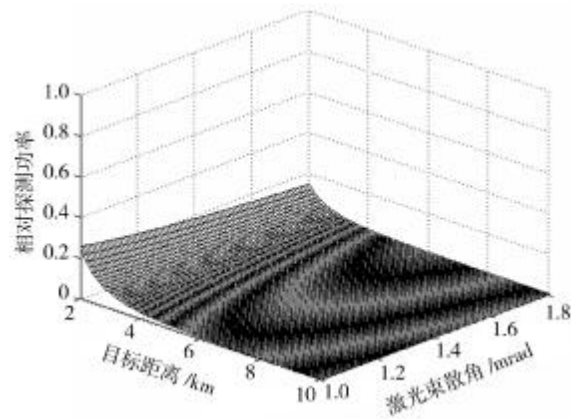


图 4 线形目标时探测功率随目标距离和束散角的变化

(10)式~(14)式代入信噪比的表达式, 并整理得:

$$\text{SNR} = \frac{\eta_D P_r^2}{h\nu [2B(P_r + P_{\text{Bk}})] + K_1 P_{\text{Dk}} + K_2 P_{\text{Th}}} \quad (15)$$

P_r 是接收信号光功率, P_{Bk} 是背景光功率, P_{Dk} 是探测器暗电流功率, P_{Th} 是热噪声功率, 系数 $K_1 = K_2 = \eta_D R_i^2$ 。把(6)式~(8)式代入(15)式, 得到点目标、扩展目标和线目标的信噪比表达式:

$$\text{SNR}_{\text{pt}} = \frac{256\eta_D}{h\nu [2B(P_r + P_{\text{Bk}})] + K_1 P_{\text{Dk}} + K_2 P_{\text{Th}}} \frac{(p_r A_c T_2^2 T_1 \rho_{2\pi} A)^2}{\pi^2 R^8 \theta_r^4 \omega_r^2}, \quad (16)$$

$$\text{SNR}_{\text{ex}} = \frac{16\eta_D}{h\nu [2B(P_r + P_{\text{Bk}})] + K_1 P_{\text{Dk}} + K_2 P_{\text{Th}}} \frac{(p_r A_c T_2^2 T_1 \rho_{2\pi})^2}{R^4 \omega_r^2}, \quad (17)$$

$$\text{SNR}_{\text{li}} = \frac{256\eta_D}{h\nu [2B(P_r + P_{\text{Bk}})] + K_1 P_{\text{Dk}} + K_2 P_{\text{Th}}} \frac{(p_r A_c T_2^2 T_1 \rho_{2\pi} d)^2}{R^6 \pi^2 \theta_r^2 \omega_r^2}, \quad (18)$$

从(16)式~(18)式可以看出对于点目标、扩展目标和线目标的 SNR 相应的与被测距离的八次方、四次方和六次方有关。

忽略背景和环境温度等对信噪比的影响,单纯考虑目标性质对信噪比的影响,按照(16)式~(18)式中信噪比和目标距离、激光束散角的关系,做出信噪比随目标距离和激光束散角的变化曲线(如图 5、图 6、图 7)。

4 结束语

通过引入等效散射面积,对点目标、扩展目标、线形目标的探测功率和信噪比进行数值模拟。从图 2 可以看出目标在近距离范围内($R < 2.5d/\theta_i$),对于线形目标探测系统接收到的功率最小,而对于扩展目标探测系统接收的功率最大。在目标达到较远距离时($R > 4d/\theta_i$),对于三种目标探测系统接收的功率都趋于相等。比较图 3 和图 4 可以看出,激光束散角对扩展目标探测功率的影响比线形目标大。从图 5 种可以看出,目标距离 $R \approx 1.1d/\theta_i$ 时,点目标对应的信噪比最大。当目标距离 $R > 2d/\theta_i$ 时,三种目标对应的信噪比趋于相等。比较图 6 和图 7 可以看出,激光束散角的变化对扩展目标信噪比影响比线形目标的大。

综上所述,目标的形状及大小在激光测距机的设计、定标和应用

中是重要的影响因素,应加以考虑。尤其在测程较小时,适当增加激光

束散角,能提高信噪比,同时对探测器接收功率不会产生太大影响。

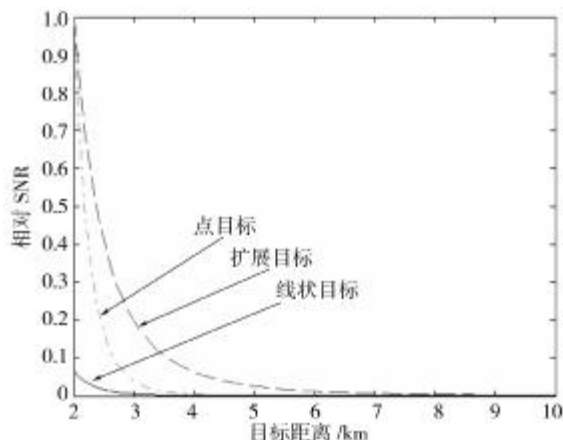


图 5 三种目标的 SNR 随目标距离的变化

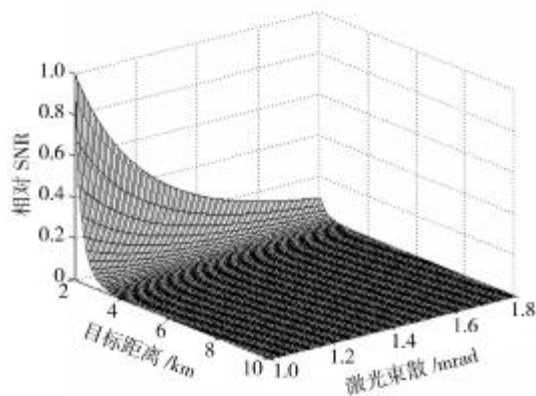


图 6 点目标的 SNR 随目标距离和激光束散角的变化

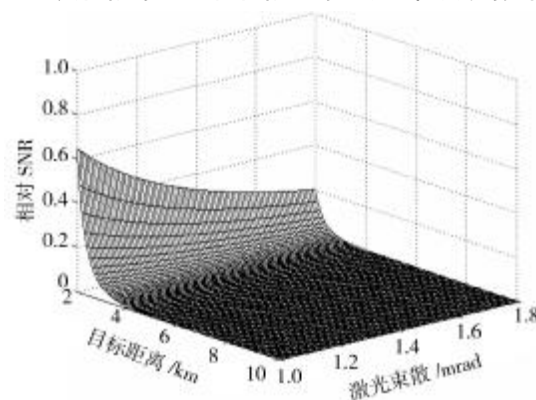


图 7 线状目标的 SNR 随目标距离和激光束散角的变化

参 考 文 献

- 1 三 浩. 激光测距的工业应用. 激光与光电子学进展, 2000, 1(11): 51-53
- 2 谭显裕. 脉冲激光测距仪测距方程和测距性能分析. 激光与光电子学进展, 1998, (3): 22-28
- 3 Byren R W. Laser range finders. IR/ED Handbook, 1993. 79-110
- 4 Yang Li, Lu Zukang, Liu Yu et al.. Numerical simulation and optimal design of the system performance for the airborne laser range finder. Proc. SPIE, 4220: 317-320
- 5 Dunne. Laser Range finder having selectable target acquisition characteristics and range measuring precision. United States Patent, No.5652651, 1997(7):19p

(下转第 34 页)