

激光目标探测装置的回波特性及目标识别技术研究*

张 辉^{1,2} 王涌天¹

(1 北京理工大学光电工程系,北京 100081)

(2 洛阳光电技术发展中心,河南洛阳 471009)

摘要 提出了一种基于目标面元三维坐标和脉冲飞行时间的激光目标探测装置的回波脉冲功率描述方法,理论推导了激光目标探测装置的探测目标和气旋粒子的面元散射光功率和回波总功率的计算公式,并给出了回波信号的仿真计算脉冲波形.同时根据目标和气旋粒子回波脉冲的幅度-脉宽信息,提出了识别目标与干扰脉冲波形的新方法.

关键词 回波脉冲功率;飞行时间;幅度-脉宽法;激光 TDD

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

0 引言

激光目标探测装置(Laser Target Detection Device,简称激光 TDD),是一种利用发射激光束指向目标,并接收到足够高的回波脉冲能量时引爆弹头的传感器装置,主要用于炮弹、导弹以及鱼雷等飞行武器中,起源于二战英国研制的炮弹中使用的无线电近距传感器,目的是提高武器系统杀伤目标的概率,而在激光问世后不久的 20 世纪 70 年代就出现了激光目标探测装置.

通常对激光 TDD 的回波信号特性的描述多采用目标面元分解的方法^[1,2],文献[1]把目标简化成几个规则几何体(锥体、圆柱体和平面体)的组合,分别求出各部分的 LRCS(Laser Radar Cross-Section,激光雷达横截面).文献[2]中使用了波束分割、粗糙面光散射理论及目标面元分解的方法求解照射面元上的回波功率,然后积分求得激光引信总的接收功率.然而对于宽波束探测近距目标的情况,应该将不同面元散射光脉冲的相对距离和飞行时间因素考虑进去,才能更为准确地描述目标的反射特性.本文提出了基于目标面元三维坐标和飞行时间的回波脉冲功率描述方法,理论推导出了面元散射光功率及对激光 TDD 的回波总功率的贡献,并根据回波脉冲波形特征,提出了一种基于幅度-脉宽的区分目标和气旋粒子回波信号脉冲的方法.

1 激光 TDD 的距离方程

因为激光引信的有效探测距离在几十米以内,需要考虑目标的体效应,我们利用面元分解法将目标分解成小面积的面元,面元分解后每个面元对应于发射源来说属于点目标,对应的点目标激光探测如图 1 所示.

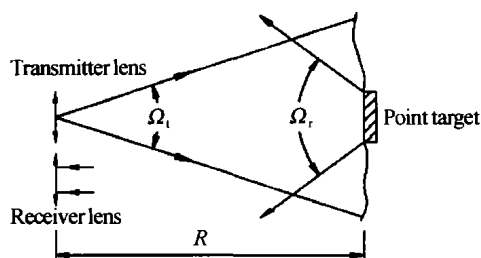


图 1 激光 TDD 探测目标的距离方程
Fig. 1 Range equation of target detection for laser TDD
激光雷达点目标条件下的距离方程^[3]为

$$P_r = \frac{P_t}{P^2 \Omega_t} (\rho A_t) \frac{A_e}{R_r^2 \Omega_r} \eta_t \eta_r \quad (1)$$

式中: P_t 为发射功率, P_r 为接收功率, R 为发射机和目标间距离, R_r 为接收机和目标间距离, Ω_t 为发射波束空间立体角, Ω_r 为目标散射波束空间立体角, ρ 为目标反射率, A_t 为目标面积, A_e 为接收机有效孔径面积, η_t 为发射路径透射率, η_r 为接收路径透射率.

2 激光 TDD 的回波脉冲

式(1)适用于目标任一面元反射到接收机的光功率计算.但它假设了整个发射光束范围 Ω_t 内能流密度是均匀的,实际上激光束能量是高斯分布的,因此为了准确计算面元散射能量,需要考虑激光束的空间分布.

激光雷达探测目标时,一般只是将各单元回波光功率峰值简单地叠加,然而激光 TDD 的探测距离与激光雷达相比小得多,而且波束一般要宽得多,因此目标被波束覆盖部分中各单元之间的距离差异 Δd 相对大得多.而 Δd 对应的飞行时间差 Δt 与脉冲宽度相近,则不同单元散射回来的脉冲达到接收机窗口的时间差异就不能忽略,求解每一时刻回波总功率时,就不能简单将各单元的回波功率叠加,必须考虑脉冲飞行时间对功率积分的影响.

2.1 激光脉冲的空间和时间分布

我们将激光脉冲沿时间和两个横向距离方向分解成向量.于是,脉冲可以表示成 $U(x, y, z, t)$, x 和

*总装十五预研项目资助(41305030301)
Tel:0379-3386969 Email:zhanghui.bit@263.net
收稿日期:2003-10-23

y 分别是横向距离的水平垂直方向, z 是沿光轴方向的距离(即为 R), t 是飞行时间方向(脉冲传播方向). 光束的辐射度轮廓假设为 Gaussian 形, 脉冲在 t 轴上的形状是模型的输入量, 可以写为 $V(t)$. 于是, 脉冲分解为

$$U(x, y, z, t) = P_T G(x, y, z) V(t) \quad (2)$$

式中 P_T 是发射总功率, x, y 和 t 取离散值, $G(x, y, z)$ 是在二维高斯曲面 (x, y, z) 处的单元功率比例. 一般情况下, 激光束能量的空间分布用高斯分布函数描述, 即

$$G(x, y, z) = \frac{1}{2\pi\sigma_x(z)\sigma_y(z)} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(z)} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2(z)}\right) \quad (3)$$

式中: x, y 分别表示 x 和 y 轴坐标, σ_x 和 σ_y 分别表示 x 和 y 方向的标准方差. 对于激光 TDD 常用的半导体激光器来说, $\sigma_x(z)$ 和 $\sigma_y(z)$ 通常是不相等的, 而且与距离 z 成正比.

$V(t)$ 是如图 2 的时间方向上的离散脉冲形状, 理论上 $V(t)$ 应该是矩形脉冲, 而实际上由于受驱动电流上升和下降时间的影响, 只能呈现如图 2 所示的类似高斯曲线分布.

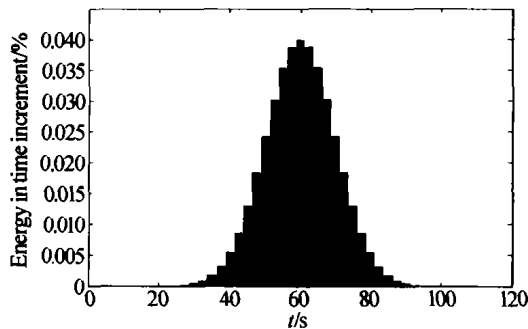


图 2 激光脉冲的离散波形
Fig. 2 Discrete shape of laser pulse

则每个面元上接收到的光功率为

$$P_i = U(x, y, z, t) A_c \quad (4)$$

式中: A_c 是面元面积.

2.2 各单元散射功率推导

假设目标各面元的散射角为 2π , 可推导出接收机获得各面元的散射光功率 P_i 公式

$$P_i = P_T \left[\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] V(t) \frac{\rho A_r A_c}{2\pi R^2 \eta_r \eta_t} \quad (5)$$

P_i 主要与面元的空间坐标 (x, y, z) 、接收孔径 A_c 、面元的双向反射分布函数(BRDF) ρ 、面元到接收机距离 R 以及脉冲飞行时间 t 有关.

如果目标表面的面元划分得足够细, 则可以认为各面元的散射属性是相同的, 即双向反射分布函数值 ρ 对于某一面元是固定值.

2.3 回波总功率计算

接收机的总回波功率是各单元所反射的光功率的积分, 但要考虑时间对其影响. 目标上被光束覆盖的各单元对应的光脉冲功率公式为

$$P_i(t) \propto V\left(t - \frac{z_i}{c}\right) \quad (6)$$

式中: t 表示时间, z_i 表示第 i 个单元对应的 z 方向距离, c 表示光速.

各单元散射光到接收机窗口处的光波信号之间光程差与波长相比很大, 因此不必考虑光波之间的相干, 由于各单元散射光功率 $P_i(t)$ 与时间有关, 因此, 它们叠加的过程中必须考虑时间 t 的影响, 即总接收光功率 P_r 是时间 t 的函数, $P(t)$ 计算公式为

$$P_r(t) = \sum P_i(t) \quad (7)$$

各单元回波光强叠加示意图如图 3, 其中(a)~(d)分别表示仿真的 5 m ($t = 33.3$ ns) 处一单元反射的光脉冲、5.15 m ($t = 34.3$ ns)、5.3 m ($t = 35.3$ ns) 和 5.45 m ($t = 36.3$ ns) 距离处的单元回波光强曲线, (e) 表示直接将各单元回波光强相加得到的光强曲线, 而(f) 表示考虑传播时间的不同距离单元叠加的光强曲线, 可以看出, 实际叠加后脉冲宽度比发射脉冲宽度大, 脉冲宽度 $\text{Tr}_{\text{target}} = t_0 + \Delta t_{\text{target}}$, t_0 表示发射脉宽, Δt 表示目标被光束覆盖面元之间的最大距离差对应的飞行时间差, 而且叠加光强比不考虑时间延迟的叠加光强小得多.

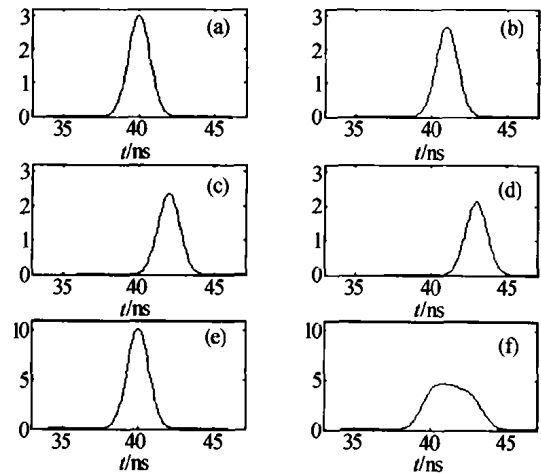


图 3 目标单元回波激光脉冲波形
Fig. 3 Sketch diagram of reflected laser pulse shape from target facet primitives

2.4 气旋粒子后向散射光脉冲分析

具有随机取向、通常悬浮在大气中的灰尘、雨、雾、烟、花粉及其它碎屑粒子通称为气旋体. 悬浮物可处于稳定状态, 也可因风或扰动影响而发生变化. 气旋粒子的后向散射一般都按照 Mie 模型^[4] 计算, 其回波脉冲宽度 $\text{Tr}_{\text{aerosol}} = t_0 + \Delta t_{\text{aerosol}}$, 由于气旋粒子被光束覆盖范围内的分布是随机的, 其可探测深度即被探测的粒子之间的距离差异比被探测目标单元之间的距离差异要大, 因此, 对应的时间差 $\Delta t_{\text{aerosol}}$ 比

探测目标的 Δt_{target} 要大;另外气旋粒子的离散性使得回波光功率比目标回波功率小得多,其回波脉冲波形示意图可见图 4.

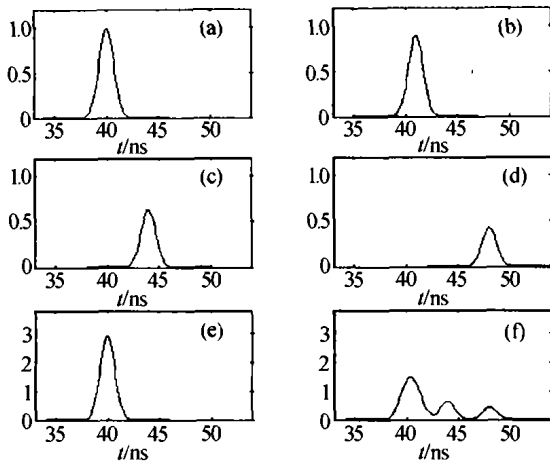


图 4 气旋粒子后向散射激光脉冲波形
Fig. 4 Sketch diagram of back-scattering laser pulse shape from aerosol

3 回波脉冲波形的幅度-宽度识别方法

由第 2.3 和 2.4 节的脉冲波形分析可知,目标反射的回波信号与气旋粒子后向散射的回波信号相比,在脉冲宽度和脉冲幅度上存在较为明显的差异,因此我们利用回波信号的幅度和脉宽信息来识别目标或气旋粒子干扰.

分别设置两个阈值比较器,一个是幅度比较器,另一个是宽度比较器.当云雾离目标较远时,其后向散射信号幅度一般低于幅度比较器阈值,而距离很近时,虽然回波信号幅度超过阈值,但是其回波脉宽将超过宽度比较器阈值;另一方面,目标进入了激

光 TDD 的探测距离内,其回波信号幅度一般高于幅度阈值,而且由于目标的可探测纵深远小于气旋粒子的可探测深度,相应地其回波脉宽小于脉宽阈值.只要根据仿真计算得出的目标各面元回波叠加信号和气旋粒子后向散射信号的幅度-脉宽的综合比较,设置合适的幅度和脉宽阈值,就容易判断回波是目标反射的还是云雾散射的.

4 结论

激光 TDD 的回波脉冲描述应该考虑各单元的距离差引起的脉冲飞行时间差异,从而产生了波形变化,本文提出的考虑飞行时间影响回波脉冲信号的理论分析方法,可以更准确地描述回波信号波形,并在此方法得出的目标回波脉冲和气旋粒子后向散射脉冲波形的基础上,提出了基于幅度-脉宽信息识别目标和气旋粒子干扰的方法.

参考文献

- 1 王日,徐玉滨. 激光探测目标仿真算法研究. 红外与激光工程, 1999, 28(3): 55 ~ 58
Wang Ri, Xu Y B. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(3): 55 ~ 58
- 2 吴振森, 陈辉. 激光引信目标近场散射特性研究. 激光与红外, 2001, 31(5): 294 ~ 297
Wu Zh S, Chen H. *Laser & Infrared*, 2001, 31(5): 294 ~ 297
- 3 Jelalian A V. *Laser Radar Systems*. Boston: Artech House, 1992. 8 ~ 10
- 4 任智斌, 卢振武, 刘玉玲, 等. Mie 理论归一化散射光强的研究. 光电子激光, 2003, 14(1): 83 ~ 85
Ren Zh B, Lu Zh W, Liu Y L, et al. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003, 14(1): 83 ~ 85

Scattering Characteristics and Targets Recognition of Laser TDD

Zhang Hui^{1,2}, Wang Yongtian¹

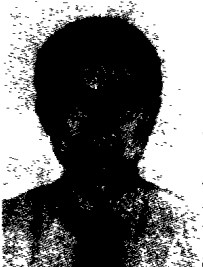
1. Opto-electronics Engineering Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

2. Luoyang Optoelectrical Development Centre, Luoyang, He'nan 471009

Received date: 2003-10-23

Abstract Based on the 3D coordinates of target facet primitives and flying-time of laser pulse, a novel method is presented here to describe the scattering characteristics of Laser Target Detection Device. The scattering power equations of target and aerosol are derived theoretically, as well as the simulating pulses wave of receiving signal is given. According to the amplitude-width information of pulse, a recognition method of discriminating target and disturbing signals is shown.

Keywords Receiving pulse power; Flying-time; Amplitude-width method; Laser TDD



Zhang Hui was born in 1972, in Luoyang, Henan Province, China. He received his B. E. degree from Optical Engineering Department, Beijing Institute of Technology in 1993 and Master degree from Opto-electronics Department, Beijing Institute of Technology in 2001. Between 1993 to 1998, he worked at Luoyang Optoelectrical Development Centre, Luoyang, Henan Province as an optical system designer. Now he is pursuing his Ph. D. degree of Optical Engineering in Beijing Institute of Technology. Now his research fields include laser target detection, target recognition and signal processing.