



脉冲激光雷达全波形建模及仿真实验

金伟正, 孙 原

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 根据脉冲激光雷达测距基本原理, 搭建脉冲激光雷达模型, 对发射电流波形、激光发射功率、接收信号功率、接收光电压波形进行了建模与仿真, 并分析产生测量误差的因素, 研究不同情况全波形分析算法精确获取激光脉冲接收时间: 对于信噪比较高的单模回波, 可使用自适应阈值法; 对信噪比较低的, 可使用波形重心法。该仿真与建模可应用于激光雷达实验教学与设计及相关科学研究。

关键词: 激光雷达; 测距; 全波仿真; 飞行时间

中图分类号: TN761.2; G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230341

Full Waveform Modeling and Simulation Experiment of Pulsed Laser Radar

JIN Weizheng, SUN Yuan

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the basic principle of pulse laser radar ranging, a pulse laser radar model is built to model and simulate the emission current waveform, laser emission power, received signal power, and received light voltage waveform. The factors that cause measurement errors are analyzed, and the full waveform analysis algorithm is studied to accurately obtain the laser pulse reception time under different conditions. For single-mode echoes with high signal-to-noise ratio, the adaptive threshold method can be used and for low signal-to-noise ratios, the waveform centroid method can be adopted. This simulation and modeling can be applied to the laser radar experimental teaching and design, as well as the related scientific research.

Key words: pulsed Lidar; ranging; full-wave simulation; time of fly

随着无人系统的发展, 环境感知变得愈加重要。激光雷达在测距、感知任务中都有其无法取代的作用, 并且其技术日趋成熟。激光雷达感知的内容主要为目标定位与测速, 具有体积更小、易于与其他电路集成并且功耗更低的特点。在阴雨、浓雾等不利条件下, 激光传输时衰减系数急剧变大, 在环流条件下回波还会出现抖动、畸变等^[1]。采用全波形分析法可以克服恶劣环境的影响。

激光雷达以发射激光的不同分为连续波激光雷达与脉冲激光雷达两种。连续激光雷达使用相位法测量距离, 具有毫米级的精度并且瞬时功率低, 但是响应速度慢, 测量距离近。脉冲激光雷达通过测量脉冲的传播时间来测定距离, 具有厘米级的精度, 响应速度快, 测量距离远, 但是瞬

时功率较大, 适用于中远距测量。二者原理与适用范围不同, 提高了激光雷达的实用性^[2-3]。

1 脉冲激光雷达基本原理

激光雷达使用时间飞行法测距, 根据激光在发射器与目标物体之间传输的时间和激光在介质中的传播速度可以得到目标距离:

$$r = C \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

式中: r 代表测距点与目标的距离, C 代表激光在介质中的传播速度, Δt 代表激光发射时间与回波接收时间的差值。

1.1 激光测距原理

连续波激光雷达发射一定频率连续的余弦波, 通过计算发射波与经过物体的反射波的相位

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1201602-05)。

作者简介: 金伟正(1966-), 男, 博士, 副教授, 主要从事图像处理、环境感知方面的科研及教学工作。E-mail:

jwz@whu.edu.cn

差确定距离^[4-5]。

脉冲激光测距系统包含激光发射模块、发射时刻鉴别模块、接收模块、接收时刻鉴别模块、计数器模块和控制模块，其中计数器模块易产生计数误差。系统框图如图 1 所示^[2,6]。

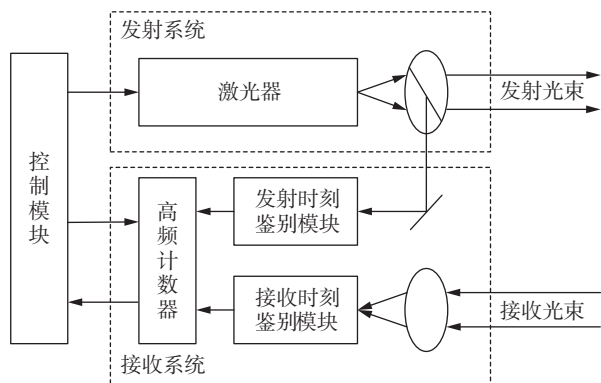


图 1 脉冲激光测距系统框图

工作原理为：激光发射器产生一束脉冲激光，在内脉冲触发发射时刻鉴别模块工作驱动高频计数器开始计时，在外经过传播到达目标并反射；接收光束触发接受时刻鉴别模块工作驱动高频计数器停止计时，通过计数器得出飞行时间计算得到目标距离。

1.2 脉冲式激光测距的误差

脉冲式激光测距的误差由时刻鉴别误差、计数时钟误差、系统延迟误差^[7]3 个部分组成。

时刻鉴别模块一般通过预先设定阈值，信号幅度大于阈值时电路启动计数。但是在接收信号时，信号幅值受多方面因素影响，与固定阈值比较会产生较大误差。一般采用更为复杂的电路进行解决，即恒比定时法与过零定时法^[8]。

计数时钟误差取决于时钟频率。通常情况下，计数器并不是如理想情况下那样从时钟脉冲的上升沿开始计时，在这种情况下就会出现计数时钟误差。通过提高计数器频率可以将计数时钟误差限制在较小范围内^[7]。

系统延迟误差分为激光发射延迟和探测电路响应延迟两大类。在由电学器件驱动激光器时，光电转化会有一个随机误差。所以一般选在光学器件被驱动的时刻开始计数。由于激光脉冲宽度在几纳秒之间，若电学器件带宽不满足要求，则会造成回波信号展宽、拖尾，出现探测电路延迟误差。

2 脉冲激光测距建模与仿真

结合硬件特性，将脉冲激光雷达信号的分析分为激光器输出特性分析、光束传播特性分析和激光探测处理电路特性分析。

2.1 激光发射信号建模

使用半导体激光器发射脉冲激光时要求激光器在短时间内发射出激光脉冲，也就是要求设计的激光器驱动电路在短时间内提供较大的驱动电流，该驱动电流的脉宽与上升沿通常在几纳秒到十几纳秒之内，这对电路的要求较高，可以用高速开关器件控制电容的快速充放电为激光发射器提供较大的驱动电流。半导体激光器驱动电路如图 2 所示。

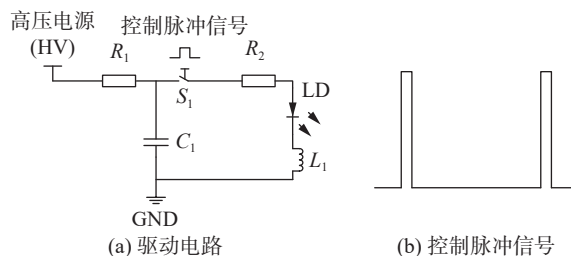


图 2 半导体激光器驱动电路图

其中驱动信号控制脉冲的高低电平控制着开关 S₁ 的通断，LD 是半导体激光器。控制脉冲的低电平控制开关 S₁ 断开，此时电容 C₁ 充电；高电平控制开关闭合，电容 C₁ 放电，在半导体激光器 LD 上产生一个瞬时大电流。此时 LD 发出一个瞬时功率较大的光脉冲信号。

要获得持续时间短且幅度较高的驱动电流，应该使电路处于欠阻尼状态，将参数代入电流方程，可以得到 LD 电流的表达式为：

$$i_{LD}(t) = \frac{V e^{-\frac{R}{2L}t}}{\sqrt{L/C - R^2/4}} \sin\left(t \sqrt{1/LC - (R/2L)^2}\right) \quad (2)$$

式中：V 为 HV 在充电时期带给电容的电平，L、R 和 C 分别对应图 2 中 L₁、R₂ 和 C₁。

2.2 激光功率特性建模

半导体激光器受到电流的驱动作用时，电子的能量从低能级向高能级跃迁，当高能级电子增多到一定值时，又会有大量电子短时间内跃迁到低能级，在这个过程中能量以光子的形式被释放出来，从而产生激光。半导体激光器的材料不同则电子跃迁时所需要的阈值电流 I_{th} 不同，当输入

到激光器的驱动电流 I_{LD} 值小于阈值电流时, 激光器不发射激光, 当 I_{LD} 值大于 I_{th} 时, 激光器输出功率图像出现拐点, 此后激光器功率与驱动电流 I_{LD} 值呈线性关系变化^[2]。此时, 激光器输出功率与驱动电流的关系为:

$$P = \frac{hv}{2q} \eta_d (I - I_{th}) = B(I - I_{th}) \quad (3)$$

式中: η_d 为功率效率, B 为激光器功率因子, 单位 V; I 为输入驱动电流, 单位 A; I_{th} 为阈值电流, 单位 A。

2.3 接收信号功率建模

为了更好地分析脉冲激光测距系统, 我们把目标物体表面假设为朗伯反射面, 反射波的强度与入射方向和物体表面之间夹角的余弦值成正比^[9]。激光被激光器发射出来, 经过大气衰减和目标反射后, 被探测器接收的脉冲信号功率为^[10-11]:

$$P_r(t) = \frac{2K\eta_r\eta_t A_r e^{-2\mu D}}{\pi^2 \theta^2} \times \frac{\rho S}{D^4} \times P_{LD}(t) \quad (4)$$

式中: $P_{LD}(t)$ 为激光发射器的功率, 单位 W; θ 为激光发射角, 单位 rad; η_t 为激光发射系统的发射效率, K 为激光束的强度分布函数, D 为目标距离, 单位 m; A_r 为光斑面积, 单位 m^2 ; S 为目标面积, 单位 m^2 ; η_r 为接受光学系统效率, μ 为大气衰减系数。

2.4 激光探测电路建模

探测器接收到的回波信号的光能不能直接被电路处理, 而是需要转换成电流或电压等可以被测量的物理量。这里采用雪崩光电二极管 (avalanche photodiode, APD) 作为探测器, 为了防止背景光导致雪崩误触发, 选择线性模式 APD^[11]。线性 APD 频率特性为:

$$M_f = \frac{M_0}{\sqrt{1 + (2\pi f \tau_c)^2}} \quad (5)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_c} \quad (6)$$

式中: M_f 代表响应度, M_0 代表恒定非调制入射光的响应度, f_c 代表截止频率, 单位 Hz; τ_c 代表探测器响应时间, 单位 s。

接收器接收到回波信号通过雪崩光电二极管 APD 转换成电流, 这个电流的形状受到多因素的影响, 如探测器频率响应特性等。假设探测器响应时间小于输入光脉冲的上升时间, 则探测器的响应能跟上回波强度变化^[7-8]。再将电流信号转换

为电压信号, 最后进入后级电路处理。通常采用的转换方法是电流脉冲接入跨阻放大器 (transimpedance amplifier, TIA) 电路, 电路模型如图 3 所示^[2]。

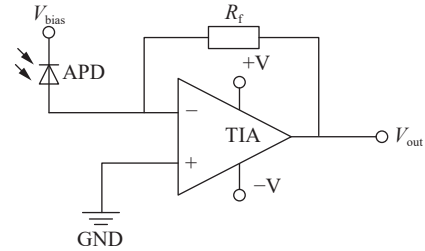


图3 探测器电流电压转换电路

分析电路参数电压输出为:

$$V_{out}(t) = \frac{2R_f M K B \eta_r \eta_t A_r e^{-2\mu D} \rho S}{\pi^2 \theta^2 D^4} \times \left(\frac{V e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \left(t \sqrt{\frac{1}{LD} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right)}{\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}}} - I_{th} \right) \quad (7)$$

2.5 仿真结果

根据式(4)、式(5)得到的 MATLAB 仿真结果如图 4~图 8 所示。

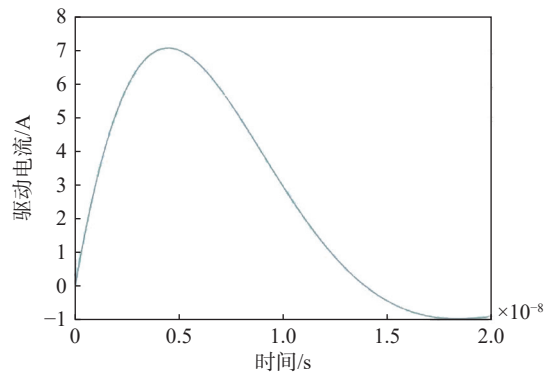


图4 脉冲驱动电流模型

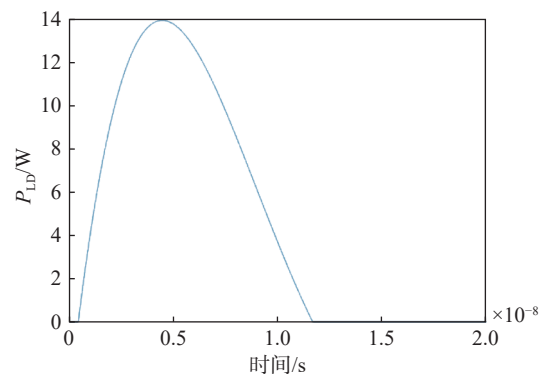


图5 激光器输出功率模型

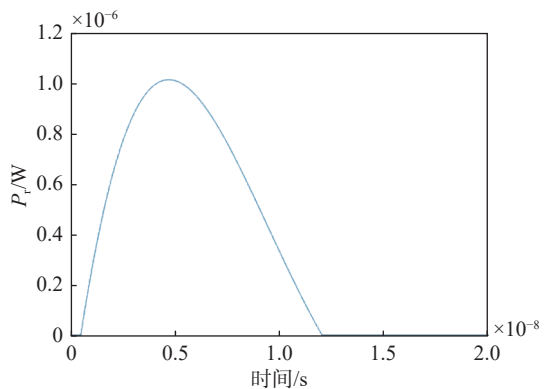


图 6 接收信号功率

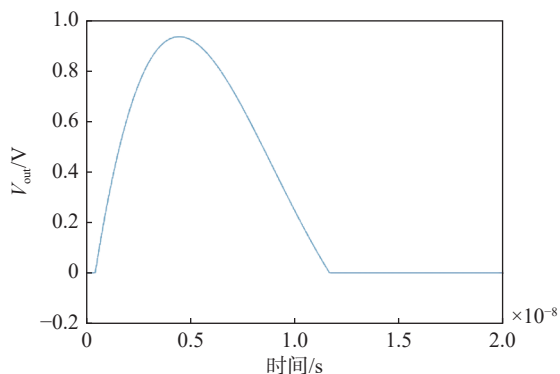


图 7 光电压信号波形

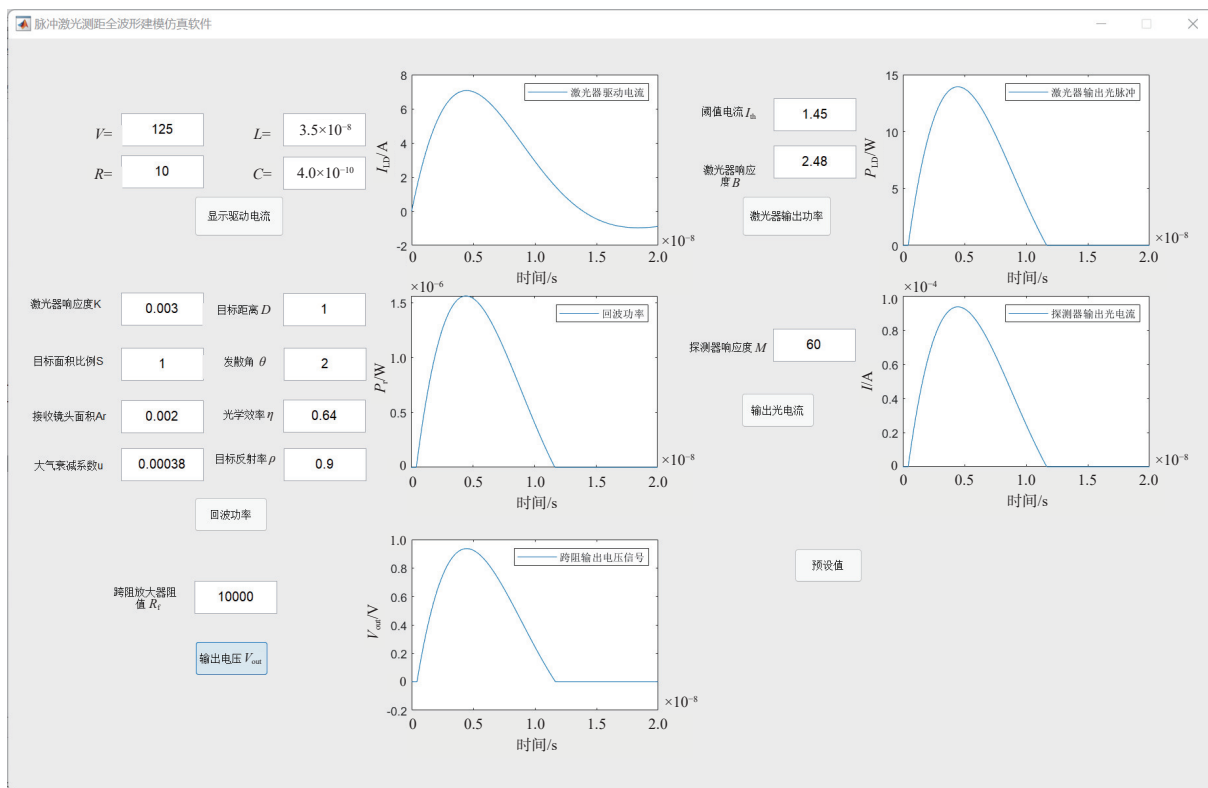


图 8 全波形建模软件用户界面

其中，图 4 为根据式(2)进行脉冲电流仿真。电流受到 R 、 L 、 C 参数的影响， R 变大时，电流峰值变小，电流脉宽变大，电路振荡越弱； L 变大时，电流峰值变小，电流脉宽变大，电路振荡越强烈； C 变大时，电流峰值变大，电流脉宽变大。

图 5 为根据式(3)进行激光输出功率仿真。图中横坐标是时间，纵坐标是激光器的输出功率。

图 6 为根据式(4)进行激光接收功率仿真。由表达式可知，激光雷达接收到回波的强度与目标距离的四次方成反比，当目标距离范围较大时，回波功率的变化范围也比较大。

图 7 为根据式(7)进行光电压信号的仿真；

图 8 为可交互软件界面。

3 脉冲激光全波形处理

分析 4 种全波形处理算法来获得精准的激光接收时间。

3.1 固定阈值法

预先设定一个固定值，当回波的幅度到达固定值即认为接收到波形，此时刻即为接收波形时刻^[12]。

3.2 峰值检测法

峰值检测法与模拟域中的过零定时法类似，过零检测法将信号输入到微分电路，信号由单极

信号变为 bipolar 信号, bipolar 信号的过零时刻即为定时时刻, 这种方法消除幅度变化引起的时间游动。过零检测法得到的时间也就是回波信号达到峰值的时刻^[13-14]。

3.3 自适应阈值法

自适应阈值法将峰值检测法与固定阈值检测法结合, 使用回波信号峰值的固定百分比作为固定阈值, 可以克服峰值检测法容易受噪声影响的缺点, 检测也更为准确合理, 当回波信号的幅值到达这个阈值时认为接收到回波信号^[15]。其原理图如图 9 所示。

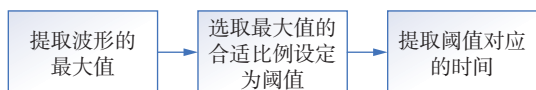


图 9 自适应阈值法算法流程图

3.4 波形形心法

为了全面利用回波信号的完整波形, 并且体现全波形的优势, 采用波形形心法提取回波信号的到达时刻。波形形心法的原理是利用合适的窗函数提取波形特性, 得到形心, 信号形心所对应的时刻就是脉冲到达时刻^[2,11]。这种算法的优势是可以完整地利用全波形, 不受信号噪声影响, 因此误差较小。

3.5 实验仿真

固定阈值法、峰值检测法、自适应阈值法与波形形心法的原理图分别如图 10~图 13 所示。

图 10 中 V_{th} 是设定的阈值电压, 当回波信号的强度到达该阈值电压的值时认为回波信号到达, 对应图中的时刻为 Received-time(回波时刻)。

图 11 中 V_{max} 是回波峰值的最高点, 当检测到回波已经达到最高点时, 认为脉冲激光测距的接收器接收到回波信号, 图中对应时刻为回波时刻。

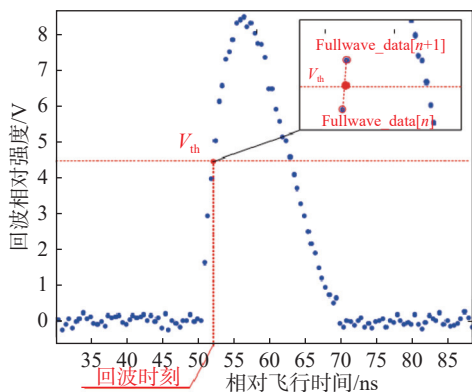


图 10 固定阈值法

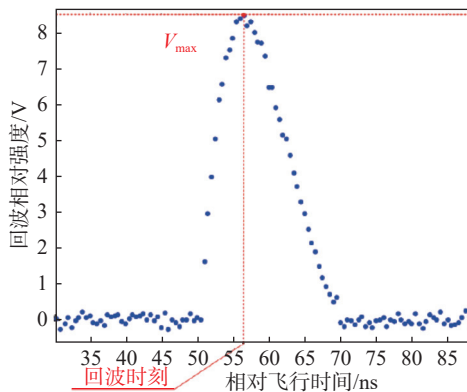


图 11 峰值检测法

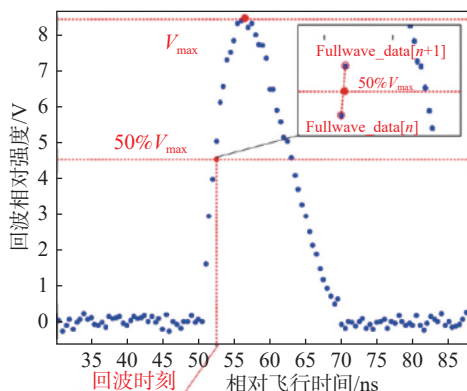


图 12 自适应阈值法

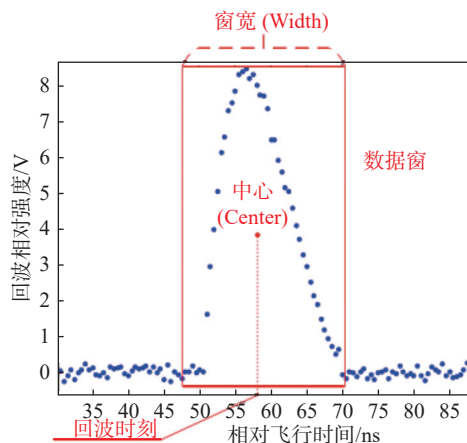


图 13 波形形心法

图 12 中 V_{max} 是检测到的回波信号的最高值, 取回波信号最大值的 50% 作为阈值, 当回波信号的幅度达到 V_{max} 的 50% 时, 认为脉冲激光测距的接收器收到回波信号, 对应图中的时刻为 Received-time。

4 种算法对应的代码如下。

1) 固定阈值算法

```
if (fullwave_data(n)==Vth)
    Received_time=t(n);
```

```

elseif (fullwave_data(n)<Vth &&
fullwave_data(n+1))
    a = (Vth-fullwave_data(n))*(t(n+1)-t(n));
    b = fullwave_data(n+1)-fullwave_data(n);
Received_time = t(n)+a/b;
else
    Received_time = 0;
end
2) 峰值检测法
max_data = fullwave_data(n);
max_time = t(n);
if (fullwave_data(n+1)>=max_data)
    max_data = fullwave_data(n+1);
    max_time=t(n+1);
end
Received_time=max_time;
Vmax=max_data;
3) 自适应阈值法
max_data=fullwave_data(n);
if (fullwave_data(n+1)>=max_data)
    max_data = fullwave_data(n+1);
end
Vmax = max_data;
if(fullwave_data(k)<=0.5*Vmax &&
fullwave_data(k+1)>0.5*Vmax)
    a=( 0.5*Vmax-fullwave_data(k) )*( t(k+1) -
t(k));
    b=fullwave_data(k+1)-fullwave_data(k);
    Received_time=t(k)+a/b;
else
    Received_time=0;
end
4) 波形形心法
Parameter width %sliding width
sum_window=sum( fullwave_data( n:n+width-
1));
if max_window<sum_window
    max_window=sum_window;
    temp_x=n;
end
window_y=fullwave_data( temp_x:temp_x+widt
h-1);

```

```

window_x=t(temp_x:temp_x+width_1);
Received_time=sum(window_x.*window_y)/sum
(window_y);

```

自适应阈值法改进了对噪声的干扰性，波形形心法可以利用全波形的特性更有效利用数据。因此，对于信噪比较高的单模回波使用的方法是自适应阈值法，对信噪比较低的单模回波使用形心法^[2,15]。

通过对雷达回波的研究可以得出雷达目标特性。雷达目标特性是目标与雷达发射的电磁波相互作用所展现出来的反映目标独有属性的特征信号，也是雷达目标探测与识别的重要基础。特别地，雷达目标特性体现了目标在时间、频率、角度、空间等不同物理域的变化规律，可以用于确定目标的运动状态、姿态、几何形状和表面材质等。受目标的电磁散射特性雷达散射截面(radar cross section, RCS)等的影响，以及噪声、杂波、干扰的影响，雷达回波强度也会有所不同，从中可以提取目标性质^[16]。

4 结束语

本文介绍了脉冲式激光雷达的基本原理，并且对激光测距进行了全过程的建模与分析，介绍了 4 种回波信号接收时间判别的算法。研究并建立了相关数学算法，分析了激光电路、发射功率、接收光电信号的模型，完成了脉冲激光雷达全波形的建模与仿真。设计了基于 MATLAB 开发的虚拟平台建立模型。本文仅完成了软件仿真部分，接下来的研究应该通过硬件电路实现激光测距验证仿真结果；本文仅完成了单目标测距分析的仿真，还需要完成多目标的测量分析。最后，通过合适的窗函数选取可以初步分析测量物体的物质特性，以更好的服务感知工作。

参考文献

- [1] 李建中, 彭其先, 李泽仁, 等. 弹载激光主动成像制导技术发展现状分析[J]. *红外与激光工程*, 2014(4): 1117-1123.
- [2] WAGNER W, ULLRICH A, DUCIC V, et al. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2006, 60(2): 100-112.

(下转第 56 页)