

## 用于激光回波信号模拟的脉宽-强度调制方式

杨仕轩<sup>1,2</sup>, 赵柏秦<sup>1\*</sup><sup>1</sup>中国科学院半导体研究所固态光电信息技术重点实验室, 北京 100083;<sup>2</sup>中国科学院大学微电子学院, 北京 100049

**摘要** 激光探测系统连接的功能模块能否正常工作, 由探测系统对探测目标的识别能力决定。针对实验室条件下高速交会的目标回波信号的模拟, 提出了脉宽-强度调制方式。该方式通过控制输入脉冲信号的脉宽改变输出光脉冲的峰值, 可用于模拟回波信号的脉冲峰值变化。设计了电路实现形式, 采用该电路驱动 860 nm 半导体激光器并进行测试。测试结果表明, 脉宽为 8~16 ns 的输入脉冲信号对应峰值功率为 3.7~8.3 W 的输出光脉冲信号。将脉宽-强度调制模块作为基本的物理实现单元, 提出了回波信号的高阶模拟方案, 模拟目标回波信号更多的信息。该调制方式原理简单、电路实现容易且成本低, 为激光探测系统的目标识别功能的设计与检验提供新的方向。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 激光探测; 回波模拟; 信号调制; 驱动电路

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1414001

## Pulse Width-Intensity Modulation for Simulation of Laser Echo Signals

Yang Shixuan<sup>1,2</sup>, Zhao Baiqin<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Solid-State Optoelectronics Information Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;<sup>2</sup>School of Microelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The ability of a detection system to recognize detection targets determines whether or not the functional modules connected to the laser detection system can work normally. A pulse width-intensity modulation scheme is proposed to simulate crossing target echo signals at high speed in the laboratory. This scheme can change the peak value of the output light pulse by controlling the pulse width of an input pulse signal and simulate the peak value changes of echo signals. In addition, the circuit implementation is designed to drive an 860 nm semiconductor laser for testing. The test results reveal that the input pulse signal with a pulse width of 8~16 ns corresponds to the output pulse signal with the peak power of 3.7~8.3 W. Taking the pulse width-intensity modulation module as the basic physical realization unit, we present a high-order simulation scheme of echo signals to simulate more information of target echo signals. This modulation method is simple in the principle, easy in circuit implementation, and low in costs, which provides a new direction for the design and inspection of the target recognition function of a laser detection system.

**Key words** lasers; semiconductor laser; laser detection; echo simulation; signal modulation; drive circuit

## 1 引言

激光探测技术广泛应用于多个领域, 具有方向性强、定距精度高、抗电磁干扰能力强等优点<sup>[1-3]</sup>。系统通过激光发射模块向目标发射激光信号, 信号经过背景环境到达目标, 光接收模块将目标的回波信号转换为电信号, 控制模块对电信号进行分析处理, 向连接的功能模块发出指令。探测系统对目标的正确识别决定功能模块的正常工作。目标的信息包含在进入接收模

块的回波信号中, 因此, 利用回波信号对探测系统进行测试, 对激光探测系统的设计及检验具有重要意义。但获取大量准确的回波信号的外场试验成本高, 不能多次重复, 所以, 建立回波信号模拟系统不可或缺。

回波信号受到背景环境的影响, 研究者对云雾、灰霾等环境下的回波信号进行了建模仿真及实验验证, 得到了环境因素对回波特性的影响趋势, 这为激光探测系统的环境适应性的研究提供了依据<sup>[4-6]</sup>。崔晓宇等<sup>[7]</sup>开发了一套仿真系统, 该系统可以根据输入的系统参数与环境

收稿日期: 2022-01-05; 修回日期: 2022-01-20; 录用日期: 2022-01-24

通信作者: \*bqzhao@semi.ac.cn

参数模拟激光雷达回波信号。王彪等<sup>[6]</sup>建立了可用于目标探测算法设计的回波仿真模型。陈杉杉等<sup>[9]</sup>建立了平面目标的脉冲激光回波模型,这为高速动态条件下的高精度测距提供了参考依据。然而,上述研究局限于对探测目标回波信号的建模及数字仿真,未产生模拟回波信号的实际光信号,难以对整个激光探测系统的性能进行验证。谭佐军等<sup>[10]</sup>设计的半实物仿真系统利用模拟信号控制光学耦合系统中的可变衰减器,可控制输出光信号的强弱,可用于模拟激光探测系统与目标交会过程中的回波光功率大小的变化。这种方式的每一次仿真间隔时间长,在激光探测系统的工作频率下不能有效地模拟整个交会时间段内的光脉冲序列。

针对上述问题,本文提出了脉宽-强度调制方式及其实现方法,设计并测试了脉宽-强度调制的激光器驱动电路。该调制方式通过响应一定脉宽范围的输入电脉冲信号,驱动激光器输出峰值变化的光脉冲信号,从而可以快速模拟交会时间段内回波光功率大小的变化。若仅需探测系统对回波信号幅值与延时进行简单识别,该调制方式可直接应用于回波信号模拟器设计。基于脉宽-强度调制方式,提出了引入数字仿真的半实物模拟方案。该方案可以连续输出幅值与脉宽都受到调制的窄脉冲光信号,从而模拟高速交会过程中目标回波信号的更多信息。

## 2 回波信号与强度调制

### 2.1 回波信号脉冲幅度特性

周视探测系统的激光发射视场有一定的视野角,

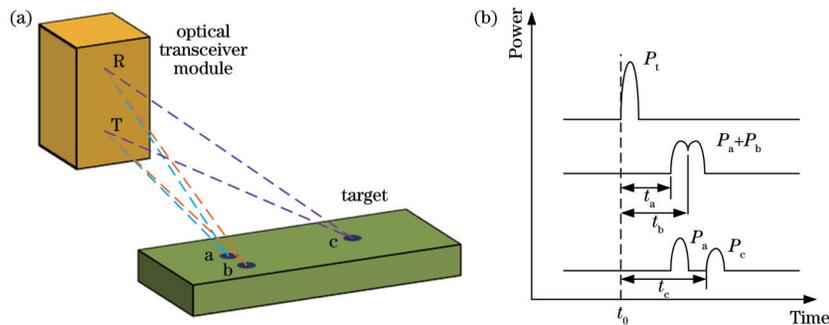


图 2 体目标不同反射点探测示意图。(a) 光程;(b) 脉冲响应

Fig. 2 Diagrams of detecting different reflection points of body target. (a) Optical path; (b) pulse response

与图 2 的脉冲响应相似,图 3 为某实际激光探测系统对不同距离独立反射点的回波信号响应,上侧信号为触发信号。因此,对回波信号的模拟避不开对发射激光的强度调制。

### 2.2 发射激光强度调制

将实验中不同反射点的反射信号叠加,得到功率大小变化的目标回波信号。进行回波信号的模拟和探测系统的检测需要产生与回波信号幅值特性相近的实际光信号。一般通过电信号控制调制系统并对光信号强度进行调制,实现方式为电-光-光和电-电-光。首位的电代表控制电信号,由数字电路按照回波信号波形产生相应的数值,数字信号经数/模(D/A)转换变成相

激光接收视场通常覆盖发射视场。当探测系统与表面不规则、高低不平的目标高速交会时,探测系统接收到的与之距离不同的反射点的散射功率大小不同。探测系统发射模块的发射光束会覆盖目标的较大面积,不同位置的反射点与收发模块的发射窗口、接收窗口的光程和不同,导致反射信号到达接收窗口的时刻有差异。此外,探测系统与目标距离有着远、近、远的变化过程。因此,时域上可能形成幅值各异的回波脉冲序列,如图 1 所示。

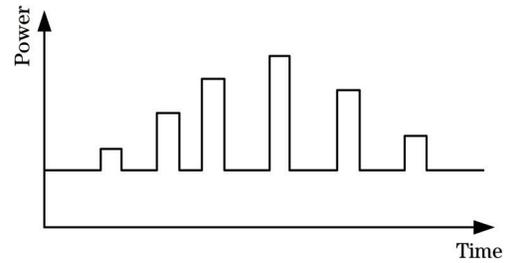


图 1 回波脉冲序列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of echo pulse train

幅值的差异不仅体现在各个脉冲之间,也可能存在于单个脉冲之内。图 2 展示了不同反射点的脉冲响应。a、b、c 为位于视场内的目标表面上的反射点,其中,a、b 的光程相近,c 的光程大于前两者。脉冲信号在  $t_0$  时刻发射,a、b 的反射信号在某一时刻叠加;c 的反射信号相对于 a 的反射信号有一定的滞后。

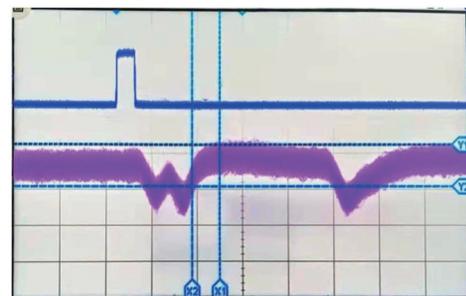


图 3 某探测系统对回波信号的响应

Fig. 3 Response of a detection system to echo signal

应的电平信号,末位的光代表激光器的输出光信号。

对于电-光-光方式,中间的“光”指的是电信号控制的光学系统。若使用控制信号控制可变衰减器完成调制,则速度过低,不满足频率要求。若采用特殊材料制备的电控衰减系统,则速度足够,但存在波长的限制,不具有通用性。对于电-电-光方式,中间的“电”指的是通过激光器的电流。若采用微波光电系统进行调制,成本过高,不适合回波信号模拟器的制作。用幅值变化的电信号直接控制带有栅极驱动芯片的激光器驱动电路时,驱动芯片具有隔离功能,降低了波形的跟随性,并不一定能输出预期的光信号。若对激光器所在放电回路的供电电压进行调制,这种方式效率低,无法完成对高速交会时间内多个脉冲信号的模拟。

本文提出的脉宽-强度调制方式即电-电-光调制,实现电路可以弥补上述具体实现方法的不足之处。

### 3 脉宽-强度调制方式

#### 3.1 发射激光强度调制

在对激光器驱动电路进行实验的过程中发现,对于纳秒量级的脉冲驱动电路,栅极电流持续对栅极电容充电,栅极电压越过密勒平台,器件才进入线性区,功率开关管完全导通需要十几纳秒甚至数十纳秒的时间。因此,控制输入脉冲信号的脉宽使开关管始终处在不完全开启的状态,在这个范围内改变输入脉宽,可以改变开关管在放电回路放电时的最小导通电阻、控制放电电流,最终控制激光器发光的强弱。

#### 3.2 电路实现

经过测试发现,对于带有栅极驱动芯片的激光发射电路,改变其输入电信号的脉宽,所控制输出的光信号峰值功率的变化范围较小,不满足设计要求。因此,考虑直接使用功率场效应(MOS)管作为发射电路的输入功率放大级。采用共漏极结构搭建电路,如图4所示, $V_{\text{pulse}}$ 为脉冲电压, $R_0$ 为信号源内阻, $R_{1,2}$ 和 $L_{1,2}$ 分别为导线寄生电阻与寄生电感, $M_1$ 为栅极总电荷极小的N沟道功率器件, $R_L$ 为源极跟随的负载,源极输出进入激光器所在放电回路中的功率开关管栅极。

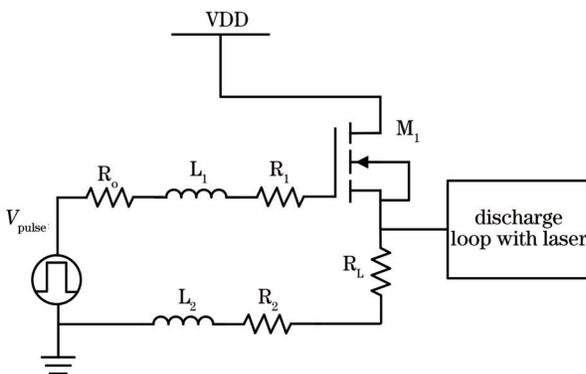


图4 电路图

Fig. 4 Circuit diagram

#### 3.3 仿真及分析

图4的电路若要达到预期的功能,需要满足两个基本条件:该电路能够直接被信号源驱动;改变输入电脉冲信号的脉宽,输出光信号波形除幅值外不发生大的改变。

使用PSpice for TI对图4中电路进行仿真,设置输出频率为10 kHz、上升沿和下降沿为3 ns、电平为5 V的脉冲信号。设置VDD为5 V的直流电源,采用与后级开关管栅极电容等值的电容与 $R_L$ 并联作为负载,改变信号源的输出脉宽由4 ns增加至14 ns,步长为2 ns,观察到 $M_1$ 源极电压波形如图5所示。输入信号的脉宽为4~12 ns,对应控制的源极脉冲电压峰值为1.3~5.4 V,继续增加脉宽至14 ns,源极电压峰值趋于稳定、脉宽略微展宽。仿真结果满足前文提到的两个条件,表明该电路能够实现脉宽-强度调制。

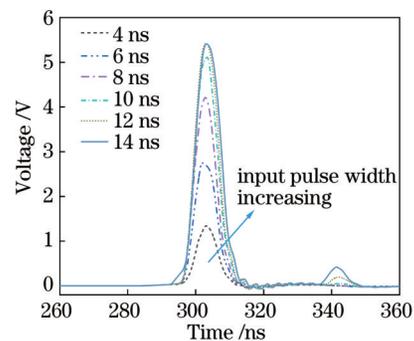


图5 输入脉宽为4~12 ns的源极电压波形仿真结果

Fig. 5 Simulation results of source voltage waveform with input pulse width of 4~12 ns

### 4 测试结果及分析

驱动半导体激光器产生纳秒量级脉宽光输出的基本要求是:半导体激光器能够产生纳秒量级脉宽的大电流,两者之间的寄生参数足够小。文中提出的电路、PCB的布局布线、激光器的封装等均满足要求。采用分立器件在PCB上搭建共漏极电路,驱动860 nm半导体激光器,测试系统如图6所示。

激光器放电回路供电电压为12 V,调整输入脉宽由8 ns增加至18 ns,步长为2 ns,采用连接示波器的光电探测器接收输出光信号,获得的激光器输出光脉冲波形如图7(a)~(f)所示。将示波器上波形以CSV的格式导出,并导入作图软件绘制的图形如图7(g)所示。使用LP-3B激光功率计测量输出平均光功率,采用平均光功率与占空比相除的方式计算峰值功率。输入脉宽分别为16 ns和18 ns的输出光脉冲波形几乎重叠,脉宽为8~16 ns的输入电脉冲控制峰值功率为3.7~8.3 W的输出光脉冲,这基本满足脉宽-强度调制的要求。脉宽下限为光输出存在的最小响应脉宽,上限为输出幅值受到调制的最大响应脉宽,在该范围内,光输出脉宽满足实际应用的纳秒量级。模拟器的输出通过光纤耦合到接收模块,所需的出纤峰值功率

低,为十几或数十 mW,通常需要在光通路中加光衰减器,测试得出功率完全满足模拟器的功率需求。

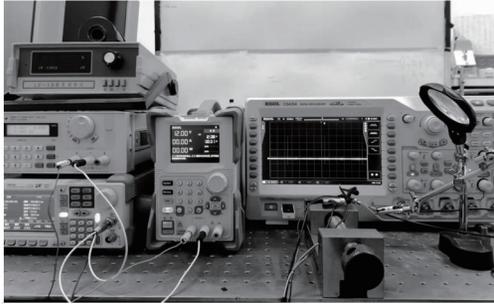


图 6 测试系统  
Fig. 6 Test system

输出光 4~8.8 ns 的脉宽与激光器放电回路的控制信号的 5.9~6.5 ns 脉宽(绘图软件得出)相比,范围更大,更无法满足输出光脉冲仅幅值变化的要求,将范围大小定义为脉宽偏移。激光器放电回路使用的开关管阈值电压大于 1.4 V,可以将输出光脉冲视作利用 1.4 V 电压的直线在图 5 中截取所得的结果,由此可以解释脉宽漂移。通过使用阈值电压更低的开关管或优化共漏级电路,使其输出的电压脉冲上升沿、下降沿更

加陡峭,进而抑制脉宽漂移。对于简单的回波信号模拟,如仅对幅值变化范围有明确要求而对纳秒量级脉宽范围没有严格要求,本文提出的电路即可满足需求,若对脉宽范围有严格要求,则需要进一步优化电路。

开关管有一定的响应时间,因此,激光器输出光脉冲相对于电脉冲略有滞后。同时,仿真使用器件的阈值电压低于实际测试所使用器件的阈值电压,输入级器件的导通时间变长,体现为脉宽可调范围的整体后移。此外,激光器放电回路在开关管开启时才能正常放电,因此,开关管栅极电压大于阈值电压时激光器才能正常发光,表现为输出光脉冲的脉宽小于输入电脉冲的脉宽。光电探测器的输出阻抗与示波器接口阻抗不完全匹配,存在信号反射,使得信号脉冲后续存在幅值衰减的振荡。

图 8 展示了输出光脉冲幅值与输入脉宽的关系。输出光脉冲幅值随输入脉宽的增大呈现非线性变化,与 NMOS(N-Metal-Oxide-Semiconductor)的输出特性相似。图 7 中输出光脉冲的最大幅值与最小幅值的比值为 3.9,适用于最大幅值与最小幅值的比值在 3.9 以内的单脉冲回波信号模拟。若实际应用需求为最大幅值与最小幅值的比值仅为 2.5,8~10 ns 的输入脉宽即可满足要求,可将其视为线性调制,与 NMOS 的线性

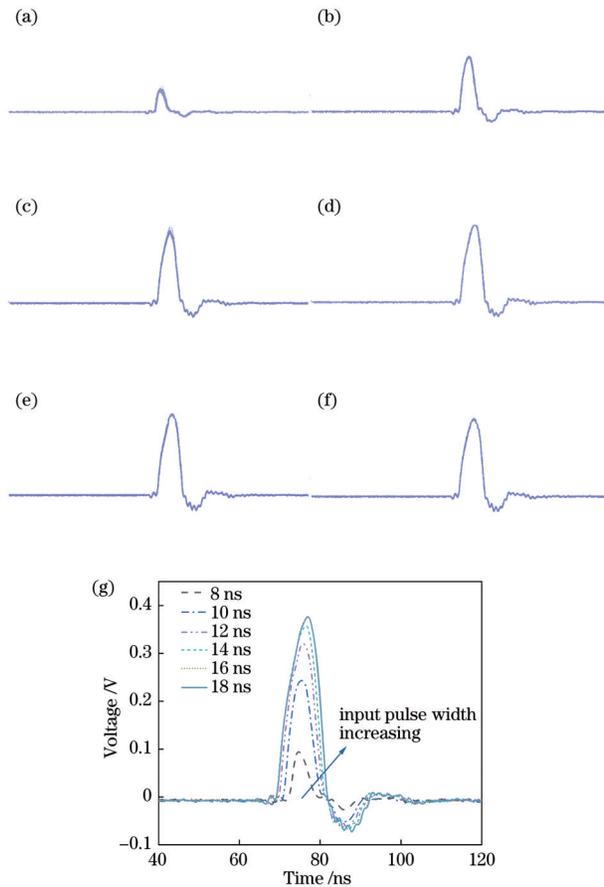


图 7 输入信号脉宽为 8~18 ns 的输出光脉冲在示波器上显示的波形和根据导出数据绘制的波形。(a)~(f)示波器显示的波形;  
(g)根据导出数据绘制的波形

Fig. 7 Output light pulse waveforms of input signal with pulse width of 8~18 ns displayed by oscilloscope and waveforms obtained based on derived data. (a)~(f) Waveforms displayed by oscilloscope; (g) waveforms obtained based on derived data

电阻区类似,归一化调制幅度为  $0.79 \text{ ns}^{-1}$ 。

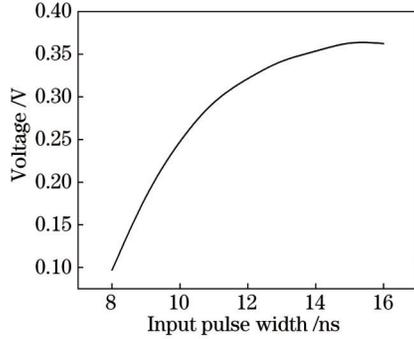


图 8 输出光脉冲相对幅值随输入脉宽的变化

Fig. 8 Relative amplitude of output light pulse varying with input pulse width

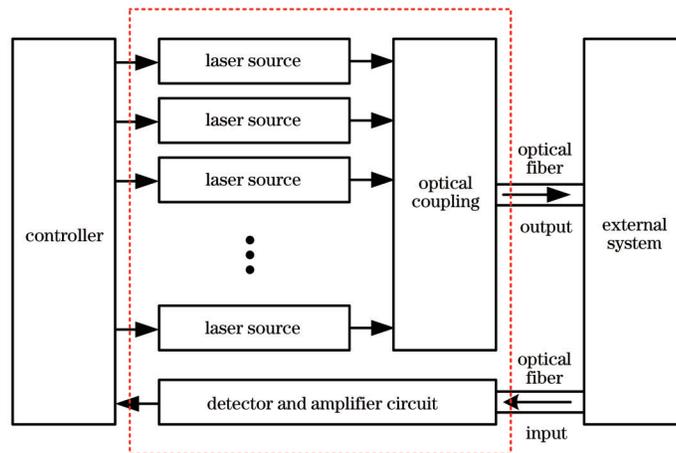


图 9 系统原理示意图

Fig. 9 System principle diagram

虚线方框内为激光收发模块。利用控制器对回波信号进行数字仿真,得到与实际回波信号相近的数字波形,再将这些数字波形分解为若干个信号,得到对激光光源的控制信号,控制信号包含脉宽、延时等信息。若干个光源对这些信号做出响应,发射出不同波形的激光,这些光信号经过耦合系统进入光纤并传输到外部系统。对信号进行观测,若多个周期的输出信号满足模拟交会时回波信号的要求,即可接入探测系统,对探测系统进行检验。外部系统可以为激光收发模块提供参考信号,光信号经过探测器及信号放大电路后转换为电信号,进入控制器。控制器对输入的电信号进行分析处理,输出控制信号,以控制光源的工作状态。

## 6 结 论

针对激光探测系统与目标高速交会的回波信号模拟,出了脉宽-强度调制方式,设计了对应的电路实现形式并进行了测试,该实现电路可以响应脉宽为  $8 \sim 16 \text{ ns}$  的输入电信号,驱动激光器输出峰值功率为  $3.7 \sim 8.3 \text{ W}$  的光信号,实现了大于 2.2 倍的峰值功率调制范围,进而完成回波信号功率大小变化的快速模拟。提出的脉宽-强度调制方式原理简单、实现成本低

## 5 回波信号高阶模拟方案

随着激光探测系统的广泛应用,在实验室条件下检验其性能对模拟探测系统与目标交会场景的要求愈发严格。高速交会时间内,反射的脉冲光信号除了幅值变化外,可能还会有延时、变形等多种变化,因此更高阶的模拟系统要求每一个脉冲都与实际接收的脉冲近似一致。实际的反射信号可以等效为若干个信号在时域上的叠加,这些信号幅值、延时各不相同。因此,采用若干个相同的上述脉宽-强度调制电路作为基本单元,对每一个模块进行脉宽调制,即输入脉宽控制输出光信号的峰值,并引入延时信息、将这些模块的输出光信号叠加就可以实现探测系统与目标交会时实际回波信号的模拟,原理如图 9 所示。

廉,适合回波信号模拟器的制作,直接适用于简单识别的激光探测系统的检验。

针对复杂识别的激光探测系统,基于该调制方式,结合数字仿真,提出了目标回波信号的高阶模拟方案。该方案通过耦合叠加若干个脉宽-强度调制的激光发射单元的输出,产生任意波形的光信号,可对激光探测系统与目标随机交会时进入探测系统的回波信号进行模拟,为探测系统目标识别功能的设计及检验提供了新的思路。

## 参 考 文 献

- [1] 彭晓钰, 杨锦清, 吴春红, 等. 基于后向传播神经网络的激光定位系统动态范围的提升[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0620001.  
Peng X Y, Yang J Q, Wu C H, et al. Improvement of dynamic range of laser positioning system based on back propagation neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0620001.
- [2] 洪光烈, 周艳波, 舒嵘, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的激光探测大气多普勒频移[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0728002.  
Hong G L, Zhou Y B, Shu R, et al. Lidar for detection

- of atmospheric Doppler shift based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0728002.
- [3] 位超杰, 闫仁鹏, 李旭东, 等. 三维成像激光雷达应用的亚纳秒激光器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1270-1280.
- Wei C J, Yan R P, Li X D, et al. Research progress of sub-nanosecond lasers for 3D imaging lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(6): 1270-1280.
- [4] 王凤杰, 陈慧敏, 陆长平. 脉冲激光引信的云雾回波波形特征仿真研究[J]. *制导与引信*, 2019, 40(2): 22-27.
- Wang F J, Chen H M, Lu C P. Study on cloud echo waveform characteristics of pulsed laser fuze[J]. *Guidance & Fuze*, 2019, 40(2): 22-27.
- [5] 赵太飞, 王世奇, 刘昆, 等. 紫外激光探测灰霾的后向散射回波特性[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20190414.
- Zhao T F, Wang S Q, Liu K, et al. Backscattering echo characteristics of haze detected by ultraviolet laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20190414.
- [6] 沈娜, 张祥金, 郭婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 864-869.
- Shen N, Zhang X J, Guo J. Attenuation of laser fuze through fog[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 864-869.
- [7] 崔晓宇, 陶雨婷, 刘群, 等. 采用半解析蒙特卡洛技术模拟星载海洋激光雷达回波信号的软件[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(2): 0203009.
- Cui X Y, Tao Y T, Liu Q, et al. Software to simulate spaceborne oceanic lidar returns using semianalytic Monte Carlo technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(2): 0203009.
- [8] 王彪, 林嘉轩, 童广德. 复杂目标激光引信回波仿真[J]. *制导与引信*, 2012, 33(4): 24-30.
- Wang B, Lin J X, Tong G D. Simulation of laser beam scattering from complex targets[J]. *Guidance & Fuze*, 2012, 33(4): 24-30.
- [9] 陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光引信探测平面目标的回波特性研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(6): 1095-1102.
- Chen S S, Zhang H, Xu X B. Echo characteristic of planar target in pulsed laser fuze detection[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(6): 1095-1102.
- [10] 谭佐军, 陈海清, 张坤, 等. 基于分光棱镜的激光引信回波信号半实物仿真[J]. *光子学报*, 2009, 38(4): 865-869.
- Tan Z J, Chen H Q, Zhang K, et al. Dispersion of light prism-based half kind simulation for echo signal of laser fuze[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 865-869.