

基于目标波形模型的多脉冲激光雷达目标信号模拟

孙俊灵¹, 马鹏阁², 孙光民¹, 金秋春², 羊毅³

(1. 北京工业大学 电控学院, 北京 100124; 2. 郑州航空工业管理学院 电子通信工程学院, 河南 郑州 450015; 3. 中航工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 多脉冲激光雷达发射数个至数百个高重频激光照射目标, 利用多脉冲回波累加实现信号积累。多脉冲激光目标检测性能的验证需要基于目标回波波形模型的动态目标信号模拟。脉冲激光目标回波波形可以由激光发射、信道传播、目标反射等环节之间的卷积传递关系加以建模。文中首先通过建立各环节的数学描述得到了回波波形的连续卷积模型。接着, 针对积分解析模型不利于工程实现的问题, 基于发射脉冲距离分辨单元提出了离散算法实现特定外形目标激光回波波形序列的直接计算。结合远程飞机目标的回波信号仿真, 指出了回波波形与目标特性的内在联系, 并通过实验进行了可信性验证。最后, 应用文中模型及方法给出了多脉冲激光雷达动态目标模拟器的研制实现, 为开展多脉冲激光目标检测研究提供必要的验证测试条件。

关键词: 多脉冲激光目标检测; 目标回波波形; 线性卷积; 动态目标信号模拟

中图分类号: TN958 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0726006

Multi-pulse laser radar target signal simulation based on target echo waveform model

Sun Junling¹, Ma Pengge², Sun Guangmin¹, Jin Qiuchun², Yang Yi³

(1. Department of Electronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Department of Electronic and Communication, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 3. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 264001, China)

Abstract: Multi-pulse laser radar emits hundreds of high repetition frequency laser echo to accumulate, and needs dynamic target signal simulation to verify the detection performance based on target echo waveform model. Pulse laser echo waveform can be modeled through the convolution relationship among the laser emission, channel propagation and target reflection. Firstly, the mathematical descriptions of each component part were established, and the echo waveform model was given by continuous convolution. Then, for the problem that the analytical model was not conducive to the engineering implementation, the discrete algorithm of target echo waveform sequence was presented based on transmitted pulse range resolution. According to the echo signal simulation of long-range aircraft target, the intrinsic relationship

收稿日期: 2015-11-25; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61331021); 航空科学基金重点项目 (2014ZC13004); 河南省高校青年骨干教师资助计划 (GGJS-140)

作者简介: 孙俊灵(1975-), 女, 博士生, 主要从事激光雷达目标检测与识别方面的研究。Email: sunjunling@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 孙光民(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事雷达目标识别及神经网络方面的研究。Email: gmsun@emails.bjut.edu.cn

通讯作者: 马鹏阁(1976-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光目标探测及信号处理方面的研究。Email: mapenge@163.com

between the echo waveform and the target characteristic was pointed out, and the reliability was verified by the experiment. Finally, the development and implementation of the multi-pulse laser radar dynamic target simulator was presented, which provided the necessary verification test conditions for the research of multi-pulse laser target detection.

Key words: multi-pulse laser radar target detection; target echo waveform; linear convolution; dynamic target simulation

0 引言

机载多脉冲激光测距雷达是通过连续发射激光脉冲串照射目标,并接收多个(数个到数百个)目标回波信号累加实现信噪比积累,进而检测远程目标^[1-2]。激光目标回波中包含了发射信号的波形特征、目标距离、目标反射特性,大气传输信道调制特性等信息。研究激光目标模拟的模型与实现,对于开发和验证多脉冲激光目标检测算法有重要意义。

目前,脉冲激光目标检测将远程目标看作点目标,回波信号为一定宽度的高斯脉冲。针对脉冲激光目标模拟,现有研究考虑大气传播、目标姿态等因素对高斯脉冲展宽的影响,结合设定回波信噪比对回波信号加以模拟发生^[3-5]。多脉冲激光雷达目标检测需要通过对数个乃至数百个高重频激光回波进行累加实现信号积累,目标回波波形宽度、起伏等特征直接影响累加效果以及动目标检测算法的性能^[6]。采用脉宽纳秒量级的激光照射飞机、舰船等十几、数十米以上径向尺寸的目标,回波波形的起伏变化反映了目标外形结构的反射特性,可以视作目标的距离像^[7-8]。因此,研究脉冲激光目标反射特性与回波波形的内在联系,并在对目标回波波形数学建模、仿真以及实验验证的基础上进行动态目标信号模拟,这些基础研究工作对于开展多脉冲目标检测性能验证是很有必要的。

文中首先根据目标回波信号与发射信号、信道传播及目标反射特性的卷积传递关系,对脉冲激光目标回波波形加以建模。接着,基于发射脉冲的距离分辨单元对波形进行离散化,利用有限长序列线性卷积实现目标回波序列的计算。针对飞机目标,基于离散波形模型进行回波波形仿真与分析,并利用实验验证了目标信号波形模拟的可信性。最后,给出了基于目标信号波形模拟的动态回波模拟器实现,可

以为多脉冲激光目标检测算法及实现系统的研制提供测试条件。

1 脉冲激光目标波形模型

脉冲激光雷达接收距离处目标反射的光功率,可看做发射激光信号输入大气传播信道,经目标后向反射得到的响应。

如图 1 所示,激光信号与系统存在传递函数关系:

$$P_R(t) = P_T(t) * hc(t) * ht(t) \quad (1)$$

其中, $t = 2R/c$ (c 为光速), 则 R 处接收到的目标反射光功率可由下面卷积关系表示^[9]:

$$P_R(R) = C_A \int_{t'=0}^{2R/c} P_T(t') h_c(R-ct'/2) h_t(R-ct'/2) dt' = C_A P_T(R) * h_c(R) * h_t(R) \quad (2)$$

其中, $C_A = \frac{c}{2} \times \frac{\pi D^2}{4} \times \eta_{sys}$, D 为接收天线光学孔径, η_{sys} 为雷达发射及接收光学系统的总透过率, C_A 是与脉冲激光雷达接收孔径及接收光路损耗相关的常数。

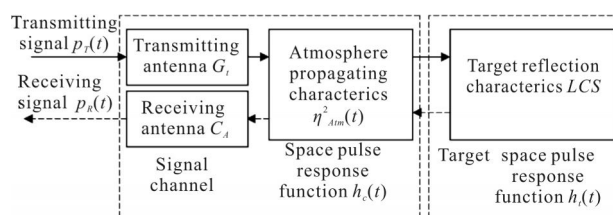


图 1 激光信号与系统的传递关系

Fig.1 Transitive relation of laser signal and system

1.1 发射信号 $P_T(t)$

经典激光雷达理论中能量为 E_p 的单个发射脉冲可表示为:

$$P_T \delta(t) = E_p \delta(t) \quad (3)$$

实际上,半导体激光器发射脉冲^[10]可以用高斯函数近似表示,设发射激光脉冲的半功率宽度为 τ_H , 峰值功率为 P_0 , 则发射信号可简化表示为:

$$P_{\tau}(t)=\begin{cases} P_0, 0 \leq t \leq \tau_H \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 大气传播信道空间脉冲响应函数 $h_c(R)$

脉冲激光雷达发射的脉冲激光束光功率由定向天线辐射,经大气传播至距离 R 处的目标后再反射回接收天线。反映这一光功率密度变化关系的空间脉冲响应函数可表示为:

$$h_c(t)=\frac{G_t}{2} \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \eta_{\text{Aim}}^2 \quad (5)$$

式中: G_t 为发射光学天线增益; R 为目标距离; $\eta_{\text{Aim}}(t)$ 为反映单程大气传输影响的参变量,单个重复周期内可视为常量,多个周期为随时间变化的随机变量。

设发射激光光束的束散角为 θ_t , 则光功率在大气传播信道的空间脉冲响应函数为:

$$h_c(R)=\frac{G_t}{4\pi R^2} \times \frac{1}{4\pi R^2} \times \eta_{\text{Aim}}^2 = \frac{\eta_{\text{Aim}}^2}{(\pi R^2 \theta_t)^2} \quad (6)$$

$h_c(R)$ 反映一定束散角的发射激光脉冲经大气信道往返传播的光功率密度变化。

1.3 目标反射空间脉冲响应函数 $h_t(R)$

远程点目标完全位于激光光斑内或者部分位于光斑之内,后向反射、散射的激光能量由目标所在处的功率密度和激光目标截面积(LCS)确定。目标反射空间脉冲响应函数 $h_t(R)$ 可由一定入射角度下朗伯散射点目标的 LCS 得到,有:

$$h_t(R)=4\beta A_c(R) \quad (7)$$

式中: β 为目标反射系数; $A_c(R)$ 为激光目标的反射面积,其数值与沿照射方向的目标形状变化有关,是距离 R 的函数。

1.4 脉冲激光目标回波波形

将公式(4)、(6)、(7)代入(2)可得目标回波光功率信号的数学表示:

$$P_R(R)=C_A P_0 \tau_R * h_c(R) * h_t(R) = \left[\beta \frac{D^2}{\pi R^4 \theta_t^2} \eta_{\text{Aim}}^2 \eta_{\text{sys}} P_0 \times \frac{c\tau_R}{2} \right] * A_c(R) \quad (8)$$

当系统参数确定并且传播环境稳定时,特定距离 R 处目标的激光回波信号波形由发射激光脉冲 τ_R 和激光目标反射面积 $A_c(R)$ 的函数卷积决定。对于点目标来说,目标被光束覆盖,目标各部分对激光回波都有贡献,回波波形中包含了目标的空间结构反射特性等特征信息。

2 激光目标波形的离散化计算

公式(8)给出的回波波形模型需要各个传递环节的函数表达式进行卷积积分。对于不同类型特定形状的目标来说,激光目标反射面积 $A_c(R)$ 难以直接获得解析表示。考虑到时宽 τ_H 的发射激光脉冲的距离分辨单元为 $dR=c\tau_H/2$ (c 为光速)。基于 dR 可将激光目标反射面积 $A_c(R)$ 和发射脉冲 $\tau(R)$ 离散化,利用有限长序列的离散线性卷积计算得到激光目标波形序列。

设激光入射方向与目标法线方向的夹角为 θ , 沿照射方向目标径向长度为 l , 目标回波信号离散化计算步骤如下。

(1) 基于发射脉冲分辨单元确定距离发射脉冲序列

时宽 τ_H 的发射激光脉冲的距离分辨单元为 $dR=c\tau_H/2$ 。光束从径向距离上可视为若干个宽度为 $dR=c\tau_H/2$ 、功率为 P_0 的单个激光脉冲的组合 $\tau(R)$ 。将光功率归一化为 1, 则 $\tau(R)$ 离散序列表示为:

$$\tau(n)=\{\tau_n=1\}, n=1, \dots, M \quad (9)$$

发射激光脉冲离散序列长度 $M=c\tau_H/dR$, 结合激光目标距离分辨距离 $dR=c\tau_H/2$, 可知 $M=2$ 。因此,不同脉宽的发射激光脉冲均可离散为 $\tau(n)=\{1, 1\}$ 。时宽越窄的脉冲对应的单位距离越小,目标分辨率越高。

(2) 计算激光目标反射面积 $A_c(n)$ 点数

入射角为 θ , 目标径向距离为 l , 离散距离单元为 $dR=c\tau_H/2$, 则激光目标反射面积离散序列 $A_c(n)$ 的点数为:

$$N=[l\cos\theta/dR] \quad (10)$$

(3) 计算目标外形面积离散序列 $A_c'(n)$

沿目标径向,以 dR 为单元,依据目标外形尺寸可计算出目标外形面积的 N 点离散序列 $A_c'(n)$ 。

(4) 计算激光目标反射截面积的离散序列 $A_c(n)$

目标反射面积为外形面积在入射角度 θ 的投影 $A_c(n)=\{A_n\}=\{A'(n)\cos\theta\}, n=1, \dots, N, A_n$ 为第 n 个宽度为 dR 的激光目标反射截面积数值。

(5) 由 $\tau(n)$ 与 $A_c(n)$ 的有限长序列线性卷积得到目标回波序列

$$S(n)=\tau(n)*A_c(n)=\sum_{k=1}^n \tau(k)A_c(n-k) \quad (11)$$

$A_c(n)$ 为 N 点有限长序列, $\tau(n)$ 为 $M=2$ 点有限长

序列,则一维距离像离散信号 $S(n)$ 为 $L=N+M-1=N+1$ 点有限长序列。一维距离像波形可由公式(12)矩阵相乘计算得到。

$$\begin{bmatrix} S(0) \\ S(1) \\ \vdots \\ S(M-1) \\ S(N-1) \\ \vdots \\ S(L-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_c(0) & & & & 0 \\ A_c(1) & A_c(0) & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \\ A_c(M-1) & \dots & \dots & A_c(0) & \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \\ A_c(N-1) & \dots & \dots & A_c(N-M) & \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \\ S(L-1) & & \ddots & \vdots & \\ 0 & & & A_c(N-1) & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau(0) \\ \tau(1) \\ \vdots \\ \tau(M-1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

从物理意义上看,离散卷积的过程可视为:时间上连续的多个宽度为 dR 的激光束先后照射目标,总的回波相当于依次接收的各个反射回波波形按一定时延顺序的叠加。

3 目标回波信号波形仿真与分析

目标回波波形是关于目标各部分的时延、光斑中的位置、后向反射率以及目标结构起伏的联合调制函数。目标类型不同,回波波形也不同。

3.1 飞机目标外形简化模型

对于机载脉冲激光雷达,远程飞机目标为点目标,反射面积可看作各部分物理光学反射的矢量合成。飞机目标外形由机头(A)、机翼(B)、机尾(C)等部分组成。为便于分析,机头部分可简化为圆锥机头加圆柱体机身,机翼为一定厚度的薄梯形体,机尾为垂直三角尾翼与水平三角尾翼平面。

如图 2 所示,飞机总长度为 l 、圆锥体机头投影三角形面积 S_1 、圆柱体机身投影矩形面积为 S_2 、梯形机翼面积为 S_3 、尾翼三角形面积为 S_{4_0} 和 S_{4_1} 。设定飞机目标总长度 $l=15$ m,机头、机身、机翼及尾翼长度为 $l_1=3$ m, $l_2=3$ m, $l_3=6$ m, $l_4=3$ m。翼展 10 m,机翼厚度为 0.2 m,单个尾翼宽度为 3 m。

3.2 不同照射角度下、不同脉冲宽度激光照射飞机目标的回波波形仿真

针对机载脉冲雷达远程目标探测不同入射角度、不同脉宽的激光照射条件,仿真飞机目标的回波波形离散序列。其中,横轴为序列点数(距离单元的

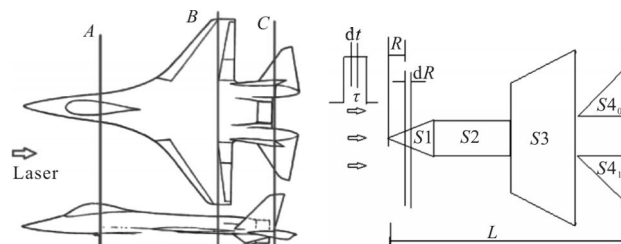


图 2 远程飞机目标激光照射下反射面积简化模型

Fig.2 Simplified model of reflection area of remote aircraft targets under laser irradiation

整数倍数),纵轴为回波强度。

3.2.1 入射角 θ 分别为 0° 、 60° 、 90° 时,脉宽为 10 ns 的激光目标波形仿真

发射激光脉宽为 $\tau_H=10$ ns,对应的距离像分辨单元 $dR=1.5$ m,对发射脉冲光束及飞机外形进行离散化,计算不同入射角度激光目标反射面积数值序列如表 1 所示。

表 1 不同角度激光目标 LCS 的离散计算

Tab.1 LCS value of laser target from different angles

θ	τ_H/ms	dR/m	$\tau(n)$	LCS
0°	10	1.5	{1,1}	{0.2,1,0,0,0.5,1.2,2,4,0.1,0.1}
60°	10	1.5	{1,1}	{0.5,1.8,5,7,4.5}
90°	10	1.5	{1,1}	{19}

利用有限长序列线性卷积计算目标的回波波形序列,如图 3 所示。横轴为距离(m),纵轴为信号幅度。

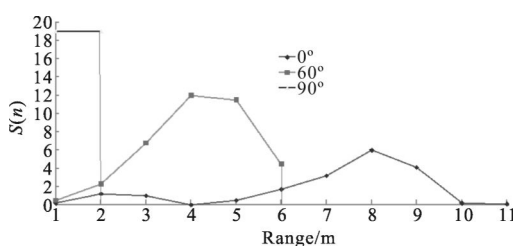


图 3 相同脉宽、不同角度激光照射目标回波波形

Fig.3 Same width, different angles laser irradiating target echo waveform

仿真结果分析:

激光目标一维距离像波形序列长度与目标径向尺寸、激光照射角度以及发射激光脉冲宽度等有关。从图 3 可以看出,当 θ 为 0° 时,激光束照射飞机的整个径向长度,回波最长为 16.5 m(11 点,分辨率为 1.5 m);当 θ 为 60° 时,激光仅照射飞机径向长度的一半,

距离像为 9 m(6 点);随着入射角度增大,波形宽度变窄,当 $\theta=90^\circ$ 时,波形最窄,为 10 ns 的激光脉冲宽度所覆盖的距离 3 m。 θ 为 90° 时的回波能量强度最大。

3.2.2 脉宽分别为 10 ns、20 ns 的激光束,以 0° 入射角照射目标一维距离像仿真

脉宽为 10 ns、20 ns 的发射信号离散序列均为 $M=2$ 点的序列 $\tau(n)=\{1,1\}$,所不同的是 10 ns 对应的距离单元为 1.5 m,20 ns 为 3 m。图 4 给出了两种脉宽的激光束从 0° 方向照射飞机目标回波序列。可以看出:

对于同一飞机目标,10 ns 发射激光的目标回波(下方曲线)波形由 11 点组成,20 ns 激光回波波形(上方曲线)仅有 6 点;随着发射脉冲变宽,回波波形的分辨率变差,回波中目标的特征变模糊。入射角为 0° 时 10 ns 激光回波 0~3 m 和 6~12 m 的波形均为三角形,反映了机头和机翼的形状特征;3~6 m 的波形则反映了机身反射的变化特征。

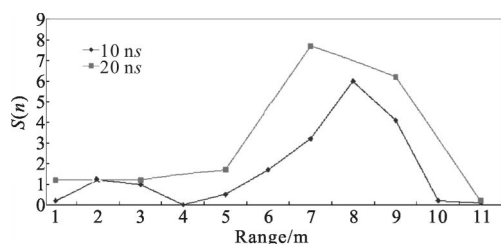


图 4 不同脉宽、相同角度激光照射目标回波波形

Fig.4 Echo waveform of laser irradiation with different pulse width and the same angle

总体上,仿真表明:飞机目标激光回波的波形变化与飞机自身的形状特征存在对应关系;波形离散算法可以直接对特定外形的目标的回波波形加以仿真模拟。

4 激光目标回波信号探测实验

激光目标回波信号探测实验目的是通过实验采集目标回波信号,验证实际回波波形与理论模型、仿真结果的一致程度,为机载多脉冲激光雷达目标信号模拟提供有意义的依据。实验系统组成如图 5 所示。

实验采用 1 064 nm 半导体激光器,激光脉冲宽度为 1~100 ns 可调(外触发方式)。发射光学天线采用扩束光路将束散角扩大至 4.5° 以适合短距离(室

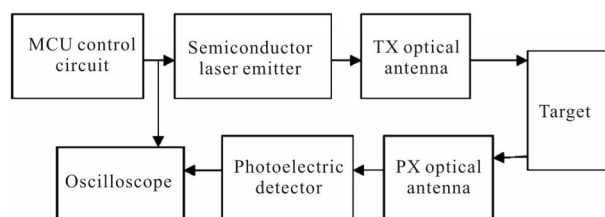
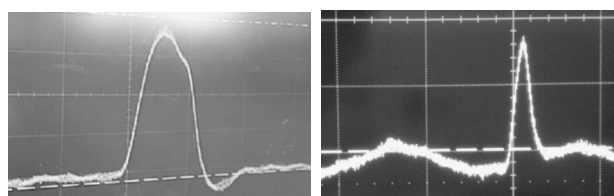


图 5 目标回波波形探测实验系统组成

Fig.5 Target echo waveform detecting system

外 150 m 处)的目标照射。光路采用均匀棒对发射激光去相干化,实现对目标的均匀照射。均匀棒透过率小,会损失一定的能量,但易于实现。目标为外场支架上放置的某型国产歼击机(机长 15 m,翼展 8 m)。控制电路发生外触发脉冲信号控制激光器发射,沿一定角度向目标照射,反射激光被接收天线汇聚,经 APD 光电二极管探测和接收电路处理后由 LeCroy 的 1 GHz 数字荧光示波器显示。

图 6 为 30 ns 宽度脉冲激光照射飞机目标时示波器采集的回波波形,图(a)中波形较宽,无法分辨到目标形状细节,但明显不是高斯波形。图(b)为 5 ns 脉宽激光照射目标时的回波波形,图中波峰宽度变窄,波形总体存在起伏,反映了飞机结构自机头至机尾的变化。波形采集实验为近距离大信噪比情况,其结果定性验证了目标回波波形与目标反射结构间存在映射关系的结论。



(a) 30 ns 的回波波形

(b) 5 ns 的回波波形

(a) Echo of 30 ns laser

(b) Echo of 5 ns laser

图 6 不同脉宽激光照射目标采集回波信号

Fig.6 Echo waveform on oscilloscope with different pulse width laser irradiating

5 基于波形模型的多脉冲激光目标信号模拟器

在某新型远程多脉冲激光测距雷达研制中,发射激光脉冲宽度约 5 ns,脉冲串重复频率 1 kHz,激光雷达可在红外定位辅助下完成对静止、运动目标的瞄准、测距及测速。研制需要针对不同类型目标进

行目标信号模拟,以测试多脉冲激光雷达的检测性能。应用文中所提出的目标信号波形数学模型,开展典型目标的离散化建模,利用线性卷积计算包含特定目标特征(外形、姿态、距离、速度等)信息的回波波形序列。在单帧回波信号模拟时,按照设定信噪比将目标波形与高斯噪声混合成为含噪目标信号。针对多帧回波,考虑大气传播特性变化对回波的动态调制^[11],各帧回波信噪比的随机起伏变化服从高斯随机过程,基于动态信噪比模拟发生目标多帧回波信号。多脉冲激光雷达动态目标模拟器工作原理框图如图 7 所示。

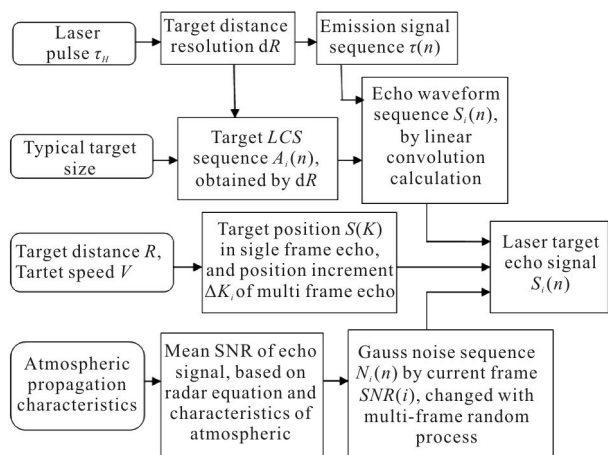


图 7 基于回波波形模型的动态目标模拟框图

Fig.7 Dynamic target simulation block diagram based on echo waveform model

基于图 7 得到的多帧动态回波序列 $S_i(n)$,经 FPGA+高速 DAC 电路产生模拟回波信号,即可输入多脉冲激光雷达信号处理板测试目标检测算法的性能指标。

6 结 论

综上所述,多脉冲激光雷达目标检测由于其累加算法的要求需要能够反映特定目标外形、姿态、距离、速度等特征信息的动态目标回波信号模拟源。文中基于发射激光、目标及大气传播信道之间的信号传递关系得到激光目标回波波形数学模型。针对解析模型不利于工程实现的问题提出了离散化算法实现不同类型目标回波波形的直接计算。通过对远程飞机目标激光回波信号的仿真分析,指出了回波波形与目标特征的内在联系,并利用目标回波探测采集实验验证了这一关系。在某新型多脉冲激光测距雷

达目标信号模拟器研制应用中,基于文中模型及方法实现了激光目标的多帧动态回波信号模拟,为研究开发复杂环境条件下针对特定空地目标的多脉冲积累检测算法提供了验证测试条件。

参 考 文 献:

- [1] Ma Pengge, Qi Lin, Yang Yi. Algorithm of improving multi-pulsed lidar range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2540-2545. (in Chinese)
马鹏阁, 齐林, 羊毅, 等. 机载多脉冲激光雷达作用距离增强算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2540-2545.
- [2] Chen Xiangcheng. Research on echo processing methods and system of pulsed laser radar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
陈向成. 脉冲激光雷达回波处理方法与系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [3] Ma Pengge, Jin Qiuchun, Liu Yi, et al. New airborne multi-pulse LADAR target signal simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2068-2072. (in Chinese)
马鹏阁, 金秋春, 柳毅, 等. 新型机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2068-2072.
- [4] Ma Pengge, Qi lin, Yang Yi, et al. Study on airborne multi-pulse lidar target signal simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0128001. (in Chinese)
马鹏阁, 齐林, 羊毅, 等. 机载多脉冲激光雷达目标信号模拟器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0128001
- [5] Wang Weiming, Chen Zhibin, Shen Xiaoyan, et al. Circuit-delay simulated testing for infrared range finders[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 72-76. (in Chinese)
王伟明, 陈志斌, 沈晓彦, 等. 红外测距仪电路延时模拟检测研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 72-76.
- [6] Jiang Haijiao. Statistical properties of high repetition rate pulse laser radar range and its image quality evaluation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013. (in Chinese)
姜海娇. 高重频脉冲激光雷达测距统计特性及其像质评价[D]. 南京:南京理工大学, 2013.
- [7] Sun Guangmin, Liu Guosui, Wang Yunhong. 1-D range profile identification of radar targets based on linear interpolation neural network [J]. *Journal of Electronics*, 1999, 21(1): 97-103. (in Chinese)
孙光民, 刘国岁, 王蕴红. 基于线性内插神经网络的雷达目标一维距离像识别 [J]. 电子与信息学报, 1999, 21(1):

- 97–103.
- [8] Yang Mingyu. Detecting of photoelectric peeping devices based on active laser detection [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 255–262. (in Chinese)
杨名宇. 利用激光主动探测技术实现光电窥视设备检测 [J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 255–262.
- [9] Zhao Y, Lea T K, Schotland R M. Correction function for the lidar equation and some techniques for incoherent CO₂ lidar data reduction[J]. *Appl Optics*, 1988, 27: 2731–2740.
- [10] Chen Yanchao, Feng Yongge, Zhang Xianbing. Large current nanosecond pulse generating circuit for driving semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 3145–3151.
陈彦超, 冯永革, 张献兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒级窄脉冲驱动电路 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 3145–3151.
- [11] Wang Ligu, Wu Zhensen, Wang Mingjun. Scattering of a general partially coherent beam from a diffuse target in atmospheric turbulence [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(9): 205–211.