

文章编号: 1001-3806(2011)01-0011-04

遮蔽目标激光雷达回波波形的建模与仿真

黄涛^{1,2}, 胡以华^{1,2*}, 赵楠翔^{1,2}, 蒲晓丰^{1,2}

(1. 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 为了探索利用激光雷达探测遮蔽目标, 研究了遮蔽目标对激光雷达回波波形的影响, 采用数学建模的方法, 构建了遮蔽目标激光雷达回波模型。该模型充分考虑到脉宽展宽、光谱反射率、退偏振等因素对回波波形的影响, 并利用该模型取得了对遮蔽目标激光雷达回波波形的仿真数据。结果表明, 不同目标的反射率和退偏度对回波波形有着较大的影响, 这为今后研究利用回波波形探测遮蔽目标奠定了基础。

关键词: 激光技术; 波形仿真; 建模; 遮蔽目标

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.004

Simulation and modeling of lidar waveforms returned from obscure targets

HUANG Tao^{1,2}, HU Yi-hua^{1,2}, ZHAO Nan-xiang^{1,2}, PU Xiao-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restriction of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: In order to explore the detection of obscure targets by means of lidar, the effects of obscure targets on returned lidar waveforms were studied. By using the method of mathematical modeling, the model of lidar waveforms returned from obscure targets was constructed, in which the effects of pulse stretch, spectrum reflectivity and depolarization on return waveforms were considered. The simulation data of the waveforms returned from obscure targets were obtained based on this model. The simulation data indicate that the reflectivity and depolarization of different targets has the prominent effect on return lidar waveforms, provide a foundation for future study on the detection of the obscure target based on return lidar waveforms.

Key words: laser technique; waveform simulation; modeling; obscure target

引言

遮蔽目标通常指被伪装网、林木等各类人工或自然遮蔽物所遮挡的目标。对遮蔽目标的探测长久以来一直是军事侦察领域中关注的方向, 在目前的军用遥感成像中, 主要局限于利用各类光学成像或合成孔径雷达成像装置获取区域目标的2维影像, 再通过后期计算机辅助目标识别、专家判读等方式实现对目标的发现和识别。这些成像方法虽然对遮蔽目标具有一定的识别效果, 但也存在许多不足。

利用高亮度、高方向性和高相干性的脉冲激光直接对目标主动成像, 其具有快速、主动、高精度地获取目标立体特征信息的特点, 并且对于遮蔽物有良好的穿透性。利用激光遥感侦察遮蔽目标的研究在国内才

刚刚起步^[1], 国外在此方面的研究虽有一定进展^[2-3], 但也存在许多不足。目前, 国外研究机构获取遮蔽目标的手段主要是通过多次侦察数据的融合获取被遮蔽的目标, 此方法的主要不足在于需要对目标进行多次观测, 耗时较长, 而且必须通过后期人工判读或者复杂的识别算法方能从被遮蔽的物体中识别出感兴趣的目标。

为了有效地探测遮蔽目标, 必须开发能够迅速、有效探测遮蔽目标的技术。通过对激光回波的分解^[4], 可以获得不同目标反射的回波, 使得在单次探测中就能获得遮蔽物及被遮蔽目标的信息; 而通过对目标表面光学特性的分析, 可以有效地将目标从背景中提取出来。作者基于上述研究背景, 建立了遮蔽目标激光雷达回波波形模型, 并给出了仿真结果。

1 一般目标激光雷达回波波形

1.1 发射脉冲激光模型

激光器输出的激光脉冲在时域上具有高斯线型, 其发射激光功率可以表示为^[5]:

$$P(t) = P_0 \exp[-(t - \tau/2)^2 / (2\sigma^2)] \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672154)

作者简介: 黄涛(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光遥感信息处理方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: yh_hu@263.net

收稿日期: 2010-04-01; 收到修改稿日期: 2010-05-12

式中, P_0 为发射脉冲峰值功率, τ 为功率的半峰全宽, (1)式表示的是关于 $t = \tau/2$ 对称的波形, 发射脉冲的起点在 $t = 0$ 处。发射脉冲的仿真结果和与其同面积的宽度为 τ 的矩形见图 1^[6]。

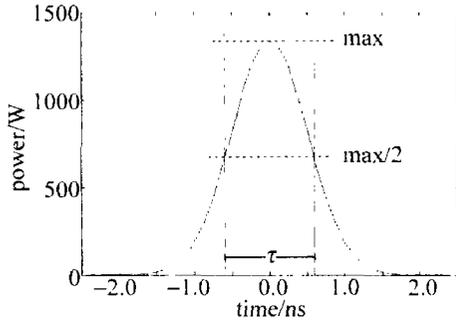


Fig. 1 Gaussian pulse and its equivalent approximate square pulse

为了便于计算, 将(1)式中的变量做如下替换:

$P_0 = E_t / [(\tau/2) \sqrt{\ln 2 / \pi}]$ 和 $\sigma = \tau / (2\sqrt{\ln 2})$, 式中, E_t 为发射脉冲能量, 将其代入(1)式得:

$$P(t) = E_t \cdot \frac{2}{\tau} \sqrt{\ln 2 / \pi} \exp[-k(t - \tau/2)^2 / \tau^2] \quad (2)$$

式中, $k = 4 \ln 2$; 经数值计算可以得知 $2\sqrt{\ln 2 / \pi} = 0.9394$, 在工程应用中可以忽略此项, 经简化后的发射激光功率的表达式为:

$$P(t) = (E_t / \tau) \exp[-k(t - \tau/2)^2 / \tau^2] \quad (3)$$

1.2 探测角度对脉宽的展宽

在激光遥感目标探测过程中, 由于实际激光脉冲在空间上存在发散角, 在时间上存在宽度, 当激光光束相对目标倾角发生变化时, 光斑内各点到光源处距离发生变化, 导致各点的回波时延发生变化, 使得回波脉冲发生展宽。

为了准确仿真目标对激光雷达的回波波形, 必须考虑脉冲展宽对波形的影响。目前, 对于脉冲展宽国内外学者已经有了比较深入的研究^[5], 为了方便后续讨论, 采用一个相对简化的脉宽展宽公式^[7]:

$$\Delta T = (2L\omega/c) \cos\theta \cdot \sqrt{r} \quad (4)$$

式中, L 为探测器到目标的距离, ω 为光束发散角, θ 为光束与目标平面夹角, r 为目标激光雷达截面积占光束截面积的比率, c 为光速。

1.3 目标反射的回波功率

激光雷达接收到的信号强度取决于目标的后向散射和望远系统所搜集的回波信号, 如果将目标视作理想的漫反射体(朗伯体), 探测系统所接收到的回波峰值功率为^[7]:

$$P_r = (E_t A_r / TL^2) \tau_a \tau_a^2 r \rho \sin\theta \quad (5)$$

式中, $T = \tau + \Delta T$; A_r 为接收光学系统的有效面积; τ_a 为光学系统的透过率, 一般情况下约为 0.8, 考虑到干涉滤光片的效应, 实际 $\tau_a \approx 0.5$; τ_a 为大气的透射率, 传

输距离在 1km 左右时, τ_a 按经验公式估算, 约为 0.7; r 为目标激光雷达截面积占光束截面积的比率; ρ 为目标表面的反射率, θ 为光束与目标平面的夹角。

1.4 回波合成及波形仿真

由于激光出射光束具有一定的发散角, 当对一定距离处目标进行成像探测时, 将形成具有一定尺寸的成像光斑, 成像光斑内各子目标对激光回波都有贡献, 系统接收到的激光回波可以看成是各子目标对激光回波的联合成像结果。目前, 国内外的学者在理论和实践上都已证明^[4,8], 激光雷达回波的波形可以近似地看作不同目标反射的高斯波形的叠加, 即激光雷达的回波是一系列高斯脉冲在时间轴上的叠加。

假设共有 n 个目标, 则第 i 个目标信号功率为:

$$P_i(t) = P_{r,i} \exp\{-k[(t - t_i)^2 / (\tau + \Delta T_i)^2]\} \quad (6)$$

式中, $P_{r,i}$ 为第 i 个目标回波脉冲的峰值功率, t_i 为第 i 个目标回波脉冲中心的时延, ΔT_i 为第 i 个目标回波脉冲的展宽时间。

则探测器接收到的全部回波信号功率为:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (7)$$

利用上述的回波波形模型对图 2 所示的目标进行仿真

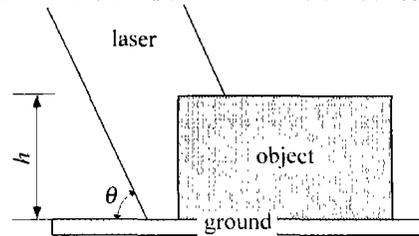


Fig. 2 Model of lidar echo

实验。对各参量作如下设定: 距离 $L = 1000\text{m}$, 光束发散角 $\omega = 1\text{mrad}$, 光束与地面夹角 $\theta = 60^\circ$, 发射脉冲能量 $E_t = 1\text{mJ}$, 激光的半峰全宽 $\tau = 1\text{ns}$, 接收光学系统的有效面积 $A_r = 0.01\text{m}^2$, 目标高度 $h = 2\text{m}$ 。对于图 2 所示情况, 可以划分成 3 个子目标, 分别是目标相互垂直的两个面及地面, 其截面积占光束截面积的比率 r 分别为 0.3, 0.5, 0.2, 表面反射率 ρ 分别为 0.5, 0.5, 0.3。最后按照信噪比为 20dB 给回波信号加上高斯白噪声。

从图 3 中可以看出, 仿真回波的波形较好地体现

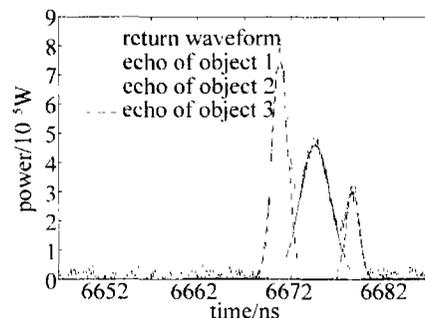


Fig. 3 Simulation of lidar echo

出了激光雷达回波的特点。其中,由于目标垂直地面的侧面与光束所成角度较小,其回波的脉冲展宽更为明显,这点在图3中明显的体现了出来。

2 遮蔽目标激光雷达回波波形

从上面建立的一般目标激光雷达回波模型可以进一步构建出遮蔽目标的激光雷达回波模型。除了要考虑遮蔽物对回波波形的影响之外,还需要结合今后的研究方向考虑物体表面的光学特性对激光雷达回波波形的影响。

2.1 遮蔽物对回波的影响

首先考虑单层遮蔽物对激光雷达回波的影响,建立如图4所示模型。

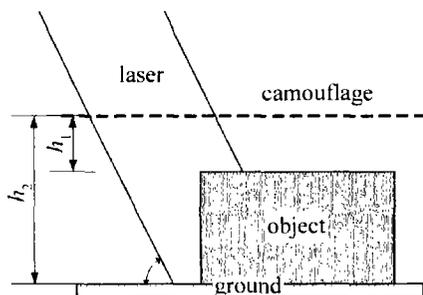


Fig. 4 Model of lidar echo with camouflage

设遮蔽物的透过率为 φ ,则对于(5)式可以改写为如下形式。

对于遮蔽物:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho (1 - \varphi) \sin \theta \quad (8)$$

对于被遮蔽目标:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho \varphi^2 \sin \theta \quad (9)$$

对于复杂的遮蔽物,如树木等,可以将其视为多个单层遮蔽物的叠加,为了方便后续讨论,本文中只考虑单层遮蔽物的情况。

2.2 光谱反射率对回波的影响

由于物体表面的固有结构特点,对不同波长的光波是有选择性反射的,因而利用物体的光谱反射特性是对目标进行分类识别的有效手段。目前,利用多光谱信息对地物进行分析处理的工作在传统的被动光学遥感领域已经广泛开展,并已取得丰硕的成果。在激光探测领域,利用不同波长的激光照射目标,测量其反射率特性的工作还只是刚刚起步^[9],利用目标的光谱特性实现对目标的分类识别,将是今后激光主动遥感的发展方向之一。

光谱反射率 ρ_λ 定义为:地物在某波段的反射通量与该波段的入射通量之比,即 $\rho_\lambda = E_r / E_i$ ^[10],此时,(8)式和(9)式可以改写为如下形式。

对于遮蔽物:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda (1 - \varphi) \sin \theta \quad (10)$$

对于被遮蔽目标:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda \varphi^2 \sin \theta \quad (11)$$

2.3 退偏振效应对回波的影响

在激光雷达目标背景特性的研究中,对于来自目标的辐射,除了强度、方向和相位,还有一个重要的方面即目标的偏振特性,它能为激光雷达目标识别提供新的手段。在军事探测中,由于目标一般是人造的,具有较光滑表面,其退偏振效应较弱;一般目标所处的背景(如泥土、植被)都是很粗糙的,其退偏振效应较强^[11]。

所谓退偏振效应,是指将偏振光转化为非偏振光。假如入射光是完全偏振光,出射光的偏振度小于1时,那么目标对光束就起了退偏作用。这种现象叫做光散射的退偏振现象。退偏振^[11]定义为正交分量(电矢量与入射波电矢量正交)的散射波强度 I_v ,和平行分量(电矢量与入射波电矢量平行)的散射波强度 I_p 之比,则退偏振度可以表示为: $D = I_v / I_p$ 。若 $I_v = 0$,则 $D = 0$,这表明散射光为线偏振光;若 $I_v = I_p$,则 $D = 1$,这表明散射光为非偏振光;若 $0 < I_v < I_p$,则 $0 < D < 1$,这表明散射光为部分偏振光。

这样(10)式和(11)式重新改写为如下形式。

(1)对于平行于偏振方向的接收端

对于遮蔽物:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda (1 - \varphi) \sin \theta / (1 + D) \quad (12)$$

对于被遮蔽目标:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda \varphi^2 \sin \theta / (1 + D) \quad (13)$$

(2)对于垂直于偏振方向的接收端

对于遮蔽物:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda (1 - \varphi) D \sin \theta / (1 + D) \quad (14)$$

对于被遮蔽目标:

$$P_r = [E_i A_r / (TL^2)] \tau_o \tau_a r \rho_\lambda \varphi^2 D \sin \theta / (1 + D) \quad (15)$$

2.4 回波波形仿真

在回波的仿真实验中,考虑到后续研究的开展,将实验模型设定如下:激光器使用双波长的Nd:YAG激光器,该激光器可以输出基本的1064nm和双倍频的532nm两个波长的激光,输出的激光都经过了高度的线性偏振;接收装置由两种波长、偏振相互正交的4通道组成,可以对双波长和两种偏振状态的激光回波进行有效探测。此类实验装置国外已经研制出类似的设备^[9],技术实现上是可行的。

目标采用图4所示的模型,其反射率及退偏度取自参考文献[10]和参考文献[12],具体见表1。遮蔽

Table 1 Reflectivity and depolarization of objects

	reflectivity at 532nm	reflectivity at 1064nm	depolarization
camouflage	0.20	0.56	0.6
object	0.54	0.48	0.4
ground	0.36	0.24	0.8

物距目标距离 $h_1 = 1\text{m}$, 距地面距离 $h_2 = 3\text{m}$, 遮蔽物透过率 $\varphi = 0.6$, 其余参量同 1.4 节中所设定参量。

从图 5 中可以看出, 对于不同波长、不同偏振状态

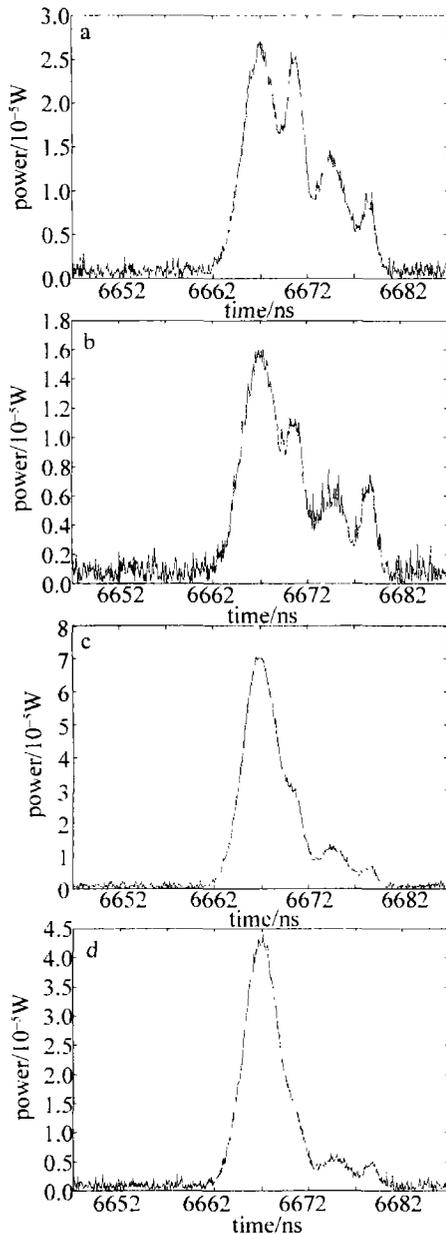


Fig. 5 Simulation of lidar echo with camouflage obtained by 4 channels
a—the 532nm copolarized return b—the 532nm cross-polarized return
c—the 1064nm copolarized return d—the 1064nm cross-polarized return

的回波, 它们的波形和幅值都有很大的不同。在 532nm, 由于在此波长遮蔽物的反射率较低, 遮蔽物的信号对被遮蔽目标的影响较小, 每个目标都显示出了明显的峰值; 而在 1064nm, 此波长遮蔽物的反射率较

高, 目标的回波受被遮蔽物的影响较大, 特别是最接近遮蔽物的目标, 其回波基本上被遮蔽物的回波淹没。此外, 对于同一波长、不同偏振状态的回波波形之间, 其波形和幅值也有着较大差异。

3 结论

基于激光雷达的遮蔽目标探测技术的研究目前还处在起步阶段, 当前对隐蔽目标的激光探测还主要停留在利用穿透遮蔽物的回波, 通过多次侦察数据的融合来获取被遮蔽的目标, 而对激光回波携带的波形、光谱反射率、去偏振等信息尚未充分挖掘。本文中针对今后研究方向, 构建了遮蔽目标回波模型, 该模型充分考虑到了脉宽展宽、光谱反射率、退偏振等因素对回波波形的影响, 并给出了遮蔽目标回波波形仿真结果, 为今后进一步的研究奠定了基础。

参考文献

- [1] HUANG T, HU Y H, LI L, *et al.* The study of the obscure target detection base on laser remote sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(51): 129-133 (in Chinese).
- [2] MARINO R M, DAVIS W R, RICH G C, *et al.* High-resolution 3-D imaging laser radar flight test experiments [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5791: 138-151.
- [3] BUCK J, MALM A, ZAKEL A, *et al.* High-resolution 3-D coherent laser radar imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6550: 655002/1-655002/9.
- [4] HOFTON M A, MINSTER J B, BLAIR J B. Decomposition of laser altimeter waveforms [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(4): 1989-1996.
- [5] HU Y H, WEI Q N, LIU J G, *et al.* An analysis of the characteristics of the return pulse in airborne laser beam scanning [J]. *Applied Laser*, 1997, 17(3): 109-111 (in Chinese).
- [6] BUDGE S, LEISHMAN B, PACK R. Simulation and modeling of return waveforms from a lidar beam footprint in USU lidar SIM [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6214: 62140N/1-62140N/10.
- [7] DONG J H, HU Q Q. Detecting space debris with lidar [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(2): 185-187 (in Chinese).
- [8] ZHAO N X, HU Y H, LEI W H, *et al.* Small target imaging method based on the laser echo waveform analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 748-752 (in Chinese).
- [9] TAN S X, NARAYANAN R M, HELDER D L. Polarimetric reflectance and depolarization ratio from several tree species using a multi-wavelength polarimetric lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5888: 58880M/1-58880M/9.
- [10] ZHU Sh R, ZHU B Sh, WANG H W. Processing and application of remote sensing image [M]. Beijing: Science Press, 2006: 7-14 (in Chinese).
- [11] MA G L. The study of laser echo polarization characteristic from rough surface [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2007: 18-20 (in Chinese).
- [12] CUI D, LI T, YAN W. A study on laser backscattering polarization characteristics of painted metal samples [J]. *Journal of Detection & Control*, 2009, 31(2): 42-45 (in Chinese).