

基于坐标变换的扫描激光雷达回波信号建模仿真

孙 翥 姚 园 徐正平 李 蕾

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000

摘要 激光雷达回波信号的建模仿真和分析是激光雷达成像、探测与目标识别技术的一项重要研究内容。通过对机载扫描激光雷达激光回波的数学模型进行研究,提出一种基于坐标变化的求解光线行进距离的新方法,其仿真运算量仅决定于仿真中的子光斑数,对于复杂场景的建模仿真有较大优势。基于上述方法,仿真了Z扫描式机载激光雷达系统作用于带有遮蔽物的复杂三维目标场景所得的激光回波波形,并给出了仿真结果。分析结果可知,激光回波波形不仅携带目标的距离信息,还携带了目标的反射率信息及面型信息。为利用激光雷达进行遮蔽物下的目标识别与探测奠定了基础。

关键词 遥感;激光雷达回波;建模仿真;回波变形;被遮蔽的目标

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.011004

Simulation Modeling of Scanning Ladar Echo Signal Based on Coordinates Transformation

Sun He Yao Yuan Xu Zhengping Li Lei

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130000, China

Abstract Simulation modeling and analysis of laser radar echo signal is an important research content of ladar imaging, detection and target recognition. A novel way based on coordinate transform is proposed to solve the light travel distance of object scene by studying the mathematical model of airborne scanning ladar laser echo. A method of solving the light travel distance based on a coordinate change is proposed. The simulation computation only depends on the number of laser spot segmentation in the simulation, thus has large advantages in simulation modeling of complex target scene. Based on these methods, the Z scanning airborne ladar laser echo in complex target scene with shelter is simulated, and the experimental result is obtained. The simulation datas indicate that laser echo not only has the information of target distance, but also has target surface type information and surface reflectivity information. The results provide the foundation in future study on detection of obscure target based on the ladar echo.

Key words remote sensing; ladar echo; simulation modeling; echo deformation; obscured target

OCIS codes 230.2090; 240.6700; 240.6690

1 引言

直接探测型激光雷达是一种主动式远距离成像技术,它通过获得目标场景的高精度位置-距离图像和强度图像进行目标的三维(3D)成像^[1],因此广泛应用于3D城市建模^[2]、大气环境测量^[3-5]、风场测量^[6]等民用领域和战场侦察、导弹制导等军事领域^[7]。激光雷达不仅提供除目标距离项以外的目标表面特性,还可以用于建立森林的生物量模型^[8],同时也可以用于探测伪装网下的军事目标^[9]。激光雷达的回波分析处理方法^[10]作为激光雷达探测与目标识别的核心,一直是国际上研究的热点,为了更好地支持航空侦测激光雷达的软硬件研究,开展遮蔽物下的复杂目标回波波形建模仿真技术研究具有重要的意义。

国际上已经有多个国家研究3D激光雷达仿真技术^[11],其中具有代表性的有瑞典国防研究局开发的激光

收稿日期: 2014-09-11;收到修改稿日期: 2014-10-20;网络出版日期: 2014-12-03

基金项目: 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放课题(YZHCISR12B)

作者简介: 孙 翥(1989—),女,硕士,研究实习员,主要从事激光三维成像系统的硬件和系统仿真等方面的研究。

E-mail: 18810326637@163.com

3D 仿真软件^[12],美国洛克希德马丁的 ALASS,犹它州立大学的 LadarSIM。上述软件通常着重于对激光雷达的整体系统进行分析,没有对带有遮蔽物的目标场景进行研究。而国内的激光雷达系统仿真起步较晚,大多数只针对于简单、单一场景进行建模。为了深入研究激光雷达回波波形处理算法,本文基于航空应用环境,考虑扫描成像的机载 3D 激光雷达在反伪装上的应用,对带有遮蔽物的复杂三维目标场景进行了激光雷达仿真建模。

2 建模过程

2.1 建模过程概述

机载直接探测型激光雷达通过测量纳秒级的脉冲飞行时间来计算载机到目标的距离。通过结合载机的全球定位系统(GPS)或惯性测量装置(IMU)和扫描系统,计算出扫描点的地面坐标位置,便可得出目标场景的三维信息。机载激光雷达成像系统,尤其是国内的基于雪崩光电二极管(APD)的激光雷达成像系统受到器件的限制和成像幅宽的要求,一般采用扫描成像方式^[10]。激光扫描发射系统按照扫描图样发射激光脉冲,由于激光脉冲存在固有的发散角,因此截面为圆形的激光脉冲首先照射于目标遮蔽物上,目标遮蔽物反射一部分回波至载机探测器,剩下的激光透过目标遮蔽物的间隙照射于目标上并返回至载机探测器。激光作用于目标场景的数学过程如下。

从点 O 发射出的激光可看成在空间为高斯分布,时间上为类高斯分布^[13]。

计算激光回波形成过程如图 1 所示,激光器从点 O 发射激光照射到数千米外的目标点 A 上,在目标附近形成的光斑为 I_1 ,在点 A 附近形成的空间光斑为 I_2 ,由于距离相近且激光发散角较小,可认为 I_1 与 I_2 完全一致, I_3 为光斑 I_2 沿激光光轴平移到发射点 O 的等效光斑。由 O 点发射出的激光直射到 A 后,所行进的光程为曲线 C 。在机载激光雷达中,目标的距离 Z 与光斑半径 R 存在 $Z \gg R$ 的关系,因此光程 C 可近似认为 A 到光斑 I_3 的垂直距离 AD 。因此在光程计算上,为计算简便,这里等效认为发射激光是从光斑面 I_3 发射出的平行光。

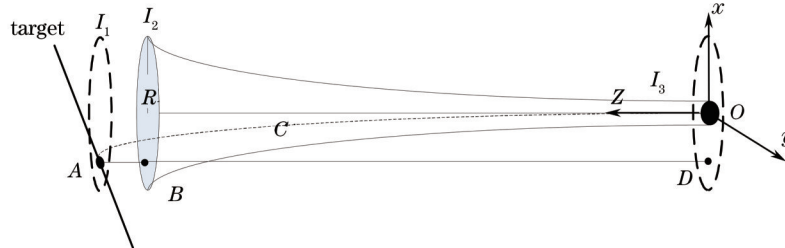


图 1 激光传输过程原理图

Fig.1 Schematic of laser transformation

当目标的面型较为复杂时,目标表面的面元具有不同的高度 z_{mn_act} ,因此具有不同的光程。而激光束在空间上具有高斯分布的辐射特性,也导致了每个面元由于空间的不同而反射不同照度的光,以上两点为激光回波变形的主要原因。为了精确计算激光回波,把激光分为 N 个子光束,在数学上可等效为把等效光斑面 I_3 分为 N 个子光束。如图 1 所示,基于等效光斑面 I_3 建立坐标系,即以激光出射点为原点,激光光轴为 z 轴,垂直方向上为 x 轴。等效光斑面上位于点 D 的子光束照射于目标上的点 $A(x,y,z_{act})$ 。

若研究整个目标面上的回波,则对物体表面进行累加^[13]:

$$P_{r_target}(t) = \sum_m \sum_n \Delta x \Delta y \frac{2}{\pi W_z^2} \exp\left(-2 \frac{x_m^2 + y_n^2}{W_z^2}\right) P_i(t - 2z_{mn_act}/c), \quad (1)$$

式中 $P_{r_target}(t)$ 为物体表面的回波, r 为激光在距离 z 处的辐射半径, W_z 为距离 z 处的激光束腰半径, λ 为激光波长, F_0 为焦距, $P_i(t)$ 为发射激光脉冲的时间函数。 Δx 与 Δy 为有限元的横向、纵向长度。

由于每个光束照射于一个面积很小的目标面元上,此时可认为探测器接收到的每个子光束返回的激光脉冲 $P_r(t)$ 相比于发射激光脉冲没有发生波形变形,只存在时间上的延迟和幅值的变化,关系为

$$P_r(t) = A \cdot P_i\left(t - \frac{2z}{c}\right), \quad (2)$$

式中 A 为激光脉冲的衰减系数,可由激光雷达距离公式得出。

由于目标的面型较为复杂,激光雷达仿真的传统方法为:先把目标分为细小的面元,再对每条光线采用光线追迹的方法,对每个面元进行求交运算。假设一个小目标被细分为1000个面元,而光斑被细分为 50×50 条子光线,那么仿真一个小物体的激光回波要进行 $1000 \times 50 \times 50$ 次求交运算^[14],运算量巨大。

本文的仿真对象为机载远距离激光雷达,基于该特点,提出了基于坐标变换的激光回波建模方法,其仿真运算量只与光斑的子光斑数有关,当小目标被细分为1000个面元,而光斑被细分为 50×50 条子光线时只需2500次计算(量化算法优势)。因此,省去了大量的运算,适合于复杂场景的激光回波建模仿真。具体的仿真步骤如下:

- 1) 对目标场景进行建模,目标场景分为探测目标和目标遮蔽物;
- 2) 按照扫描模式,得出所有扫描光斑的三维信息和角度信息;
- 3) 把每个光斑进行子光线细分;
- 4) 计算每条光线的行进距离;
- 5) 计算每条子光线的回波,并把回波进行时间上的累加,得出激光光斑作用于目标场景后的回波波形。

2.2 目标场景建模

如上文所述,目标场景的建模分为目标的三维建模和遮蔽物的三维建模。同时,每个模型根据实际情况为模型添加反射率信息。使用Abaqus软件对目标场景进行网格化,并给出面元的点组成信息。做出目标的三维模型如图2所示。

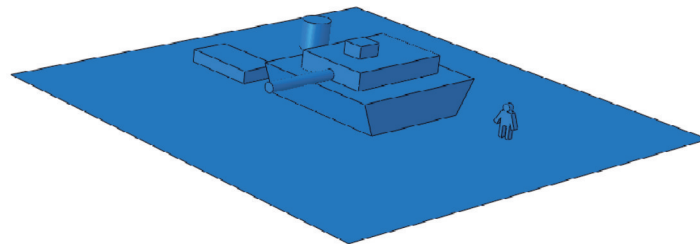


图2 目标场景三维模型

Fig.2 3D model of the target scene

随后,把所建的三维模型进行网格划分。以地面为坐标系,即以飞机飞行起始位置的正下方为原点,以飞机的飞行方向为 y 轴,垂直向上方向为 z 轴得出目标场景点云的三维坐标。并为点云按照实际情况配置反射率信息,导入Matlab软件后的点云如图3所示。

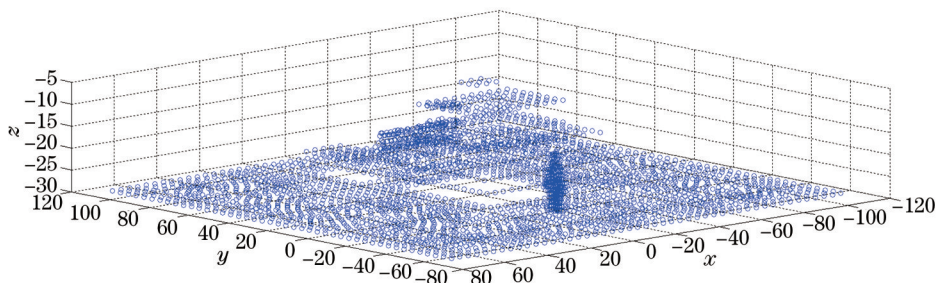


图3 目标场景的Matlab点云图

Fig.3 Matlab point cloud of the target scene

对于遮蔽物的建模,采用遮蔽率^[15]和遮蔽面元面积两个参数对遮蔽物进行描述。其中遮蔽率的定义为被遮蔽空间与遮蔽区域的比值,遮蔽物面元面积指遮蔽面元大小。按照遮蔽率为0.2,遮蔽面元面积为 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$,做出了遮蔽物三维点云图如图4所示。

2.3 扫描建模

以Z扫描为例,描述扫描建模仿真的过程。对于传统的Z扫描,扫描过程如图5(a)所示,其中, α 为激光扫描角度,也等于入射激光光轴与铅垂线的夹角即激光入射角度。激光雷达的典型Z扫描示意图及扫描图

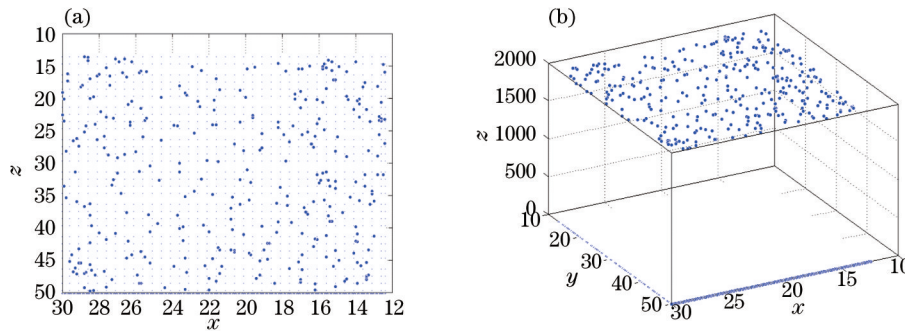


图4 遮蔽物的Matlab点云图。(a)二维;(b)三维

Fig.4 Matlab point cloud of the shelter. (a) Two dimension; (b) three dimension

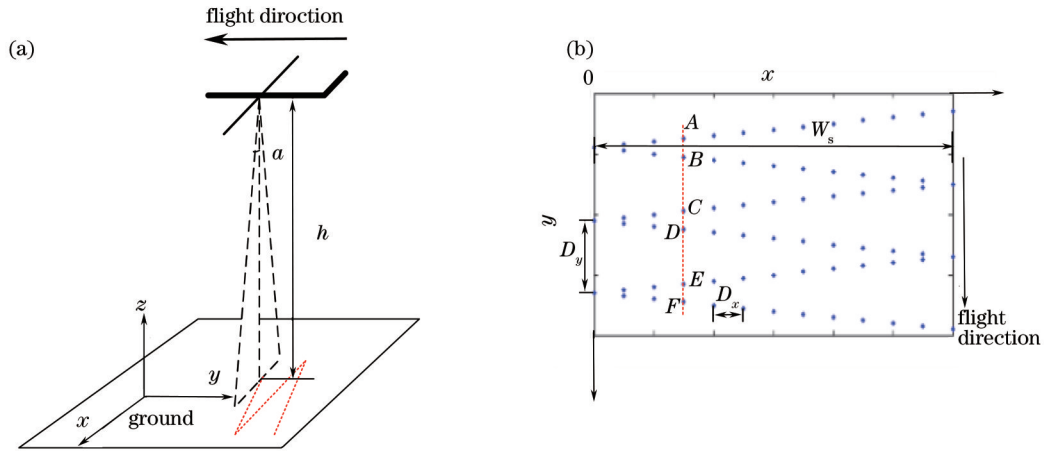


图5 Z扫描模式图。(a)激光雷达扫描过程;(b)激光雷达扫描脚印

Fig.5 Z scanning pattern map. (a) Ladar scanning process; (b) ladar scanning footprint

样如图5(b)所示。其中, W_s 为扫描的横向宽度, D_y 为扫描的纵向跨度, D_x 为扫描点横向间距。其可根据飞行高度 h , 激光扫描频率 f_{scan} , 激光重频 f_{laser} 所确定^[11]。

不同的激光入射角度可以导致光斑内光线的行进距离不同, 从而导致回波波形的变化。因此, 在仿真过程中把同一入射角度的光斑归为一组, 如图5(b)所示, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 六点的激光入射角度相等, 把它们归为一组, 并算出光斑的相对位置。

2.4 目标场景的坐标变换

建模方法的核心是把目标场景的点云由原来的地面坐标系变换到以入射激光光轴为 z 轴的光斑坐标系中。因此当根据入射角度对各个光斑进行分组后, 将按照入射角度对目标场景进行坐标变换。如图6所示, 坐标变换的原始坐标系即地面坐标系 xoy 为上文所述的地面坐标系, 以飞机飞行起点在地面垂直投影点为原点, 飞机飞行方向为 y 轴。而目标坐标系即光斑坐标系 $x'o'y'$ 按照激光入射角度不同而不同, 按照上文所述的数学等效, 如图6所示, 以飞机飞行起点为坐标原点, z 轴平行于当前光斑组的激光入射轴, y 轴平

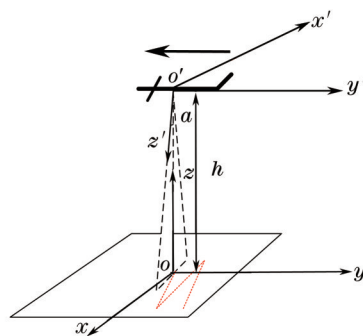


图6 坐标系示意图

Fig.6 Schematic diagram of coordinate system

行于地面坐标系 y 轴。坐标系 $x'o'y'$ 本质上为 xoy 坐标系绕 y 轴旋转而得, 旋转角度为 $180^\circ - \alpha$ 。

位于入射角度为 α 的激光光斑内, 目标场景点 A 在地面坐标系 xoy 的坐标点为 (x, y, z) , 目标坐标系 $x'o'y'$ 的坐标点 (x', y', z') 它们的数学关系为

$$(x', y', z', 1) = (x, y, z, 1) \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.5 光斑的采样方法

要准确描述激光光斑作用于复杂目标的回波, 必须将圆形激光光斑进行细分^[16]。细分过程如下: 圆形光斑总辐射度为 I , 进行 N 细分后每个子光斑的空间辐射度为 I_n , 所对应的子光斑面积为 S_n 。实际操作中, 一般以辐射度相加的和乘以单位面积得出光斑的辐射度为

$$I = \sum_N I_n S_n \approx S \sum_N I_n. \quad (4)$$

因此, 根据此细分和相加的条件, 可以得出最佳细分准则如下:

- 1) 每个子光斑的面积相等, 即要求对光斑进行等面积划分;
- 2) 子光斑内的辐射度一致, 即要求对光斑进行划分时考虑到光斑空间辐射特性, 尽量按照子光斑内等辐射度进行划分;
- 3) 子光斑内的每条光束到目标的距离尽可能相等, 由于该建模方式要适应各种面型的目标, 因此要求子光斑的数量越多越好。

实际仿真过程中, 当子光斑数量较少时精确度较低, 会引起回波波形的毛刺现象, 实验得出当光斑直径为 0.3 m , 每个光斑细分为 500 个子光斑时, 得到的回波波形较为平滑。由于每个光斑内辐射度成高斯分布, 半径一致的区域内, 辐射度相等。因此, 综合考虑 1)、2) 两点提出了基于极坐标的子光斑分割法。分割示意图如图 7(a) 所示, 得出的 Matlab 采样图如图 7(b) 所示。

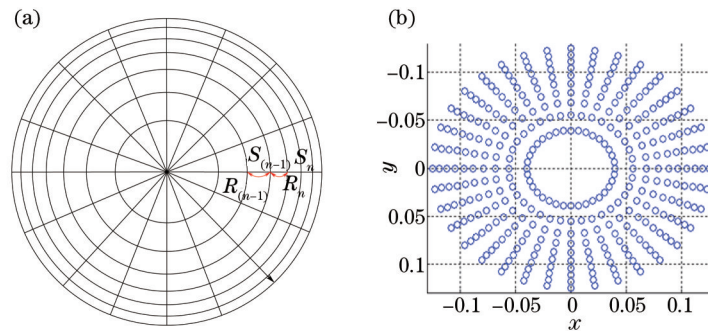


图 7 激光光斑采样示意图。(a) 分割图; (b) Matlab 采样图

Fig.7 Schematic of laser spot sampling. (a) Segmentation; (b) Matlab sampling

2.6 回波波形计算

经过上文所述步骤后, 在光斑面坐标系中, 已存在子光斑坐标和变换后的目标场景点云, 因此计算出子光线行进距离后, 即可求出子光线作用于每个小目标面元后产生的子回波 $f_n(t)$, 累加则求出每个光斑作用于目标后所产生的回波为 $\sum_N f_n(t)$ 。

仿真过程中, 首先处理遮蔽物三维模型, 再处理目标三维模型, 具体计算过程如图 8 所示。

光斑的采样效果简图如图 9 所示, 采用圆形光斑对图中三维图形进行子光斑采样的三维效果如图 10 所示。图 9 为原始图形, 图中 A 物体位于 B 物体之前, 按照光线行进的方式, 光线不会透过 A 物体到达 B 物体, 因此, 图 10 为仿真过程中采样 A 物体示意图。

得出每个子光斑到目标场景的距离后, 即可计算出每个子光斑的回波。再把子光斑在时间上进行累加, 即可得出每个光斑的回波波形。

所得的回波波形可根据系统的信噪比加上噪声, 加噪过程与噪声计算在此不再赘述。

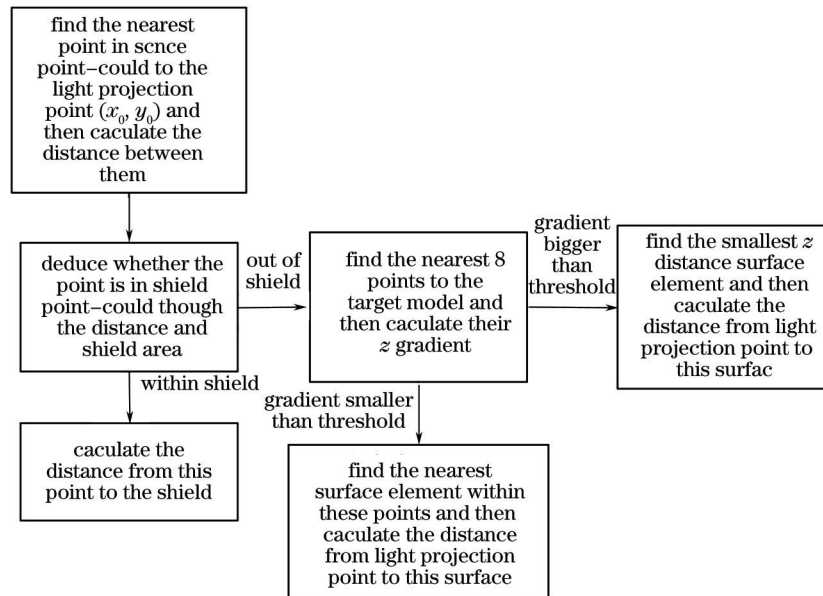


图8 光线行进距离计算过程

Fig.8 Computational process of light travel distance

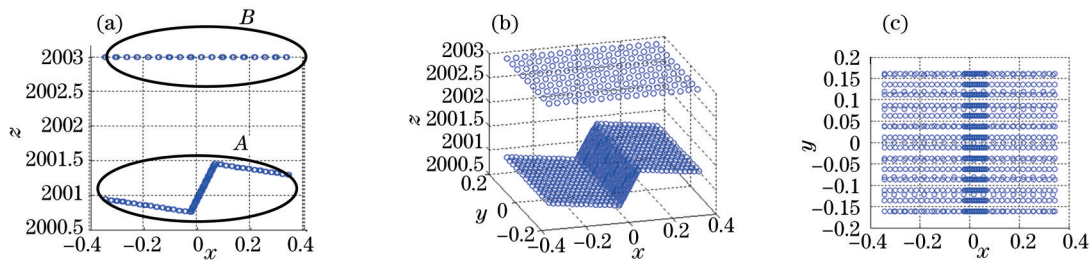


图9 目标三维示意图

Fig.9 3D sketch of target

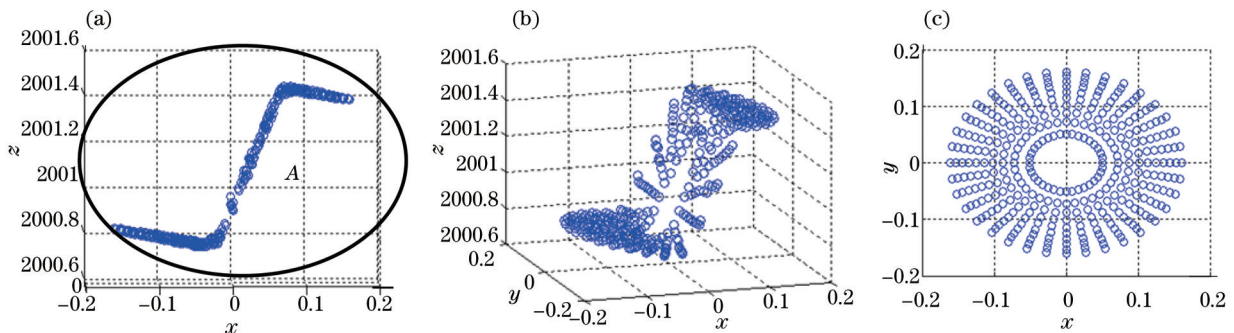


图10 采样后的三维目标

Fig.10 3D target after sampling

3 仿真结果

选择如图 11 所示的目标场景,场景中,地面所配置的反射率为 0.25,正方体 E 即箱子的反射率为 0.4,坦克的反射率为 0.45,遮蔽物即叶子的反射率为 0.6。其中激光雷达发散角为 1 mrad,成像距离为 2 km,发射半脉宽为 1 ns,激光雷达的扫描参数中, $D_y=1$ m, $D_x=0.5$ m, $f_{\text{scan}}=20$ Hz, $f_{\text{laser}}=40$ Hz。正方体 E 与坦克底座高度相等,目标场景上方 1.5 m 处有遮蔽物。选取了照射于目标场景中具有代表性的 4 个光斑如图 12 所示。图 12(a)、(d)为 A 、 D 两个光斑的波形,激光入射角度为 30° ,其中光斑 A 上方 1 m 处有遮蔽物,图 12(b)、(c)为 B 、 C 两个光斑的波形,激光入射角度为 25° 。

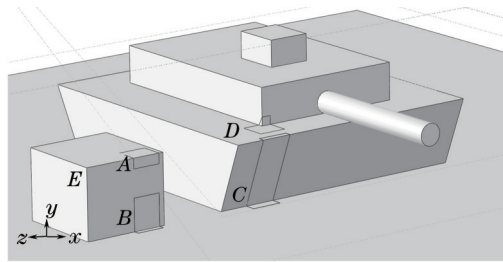


图 11 目标场景细节图

Fig.11 Detailed drawing of target scene.

仿真得到如图 12 所示的 4 个回波波形,其所对应的光斑相对位置与图 11 一致。

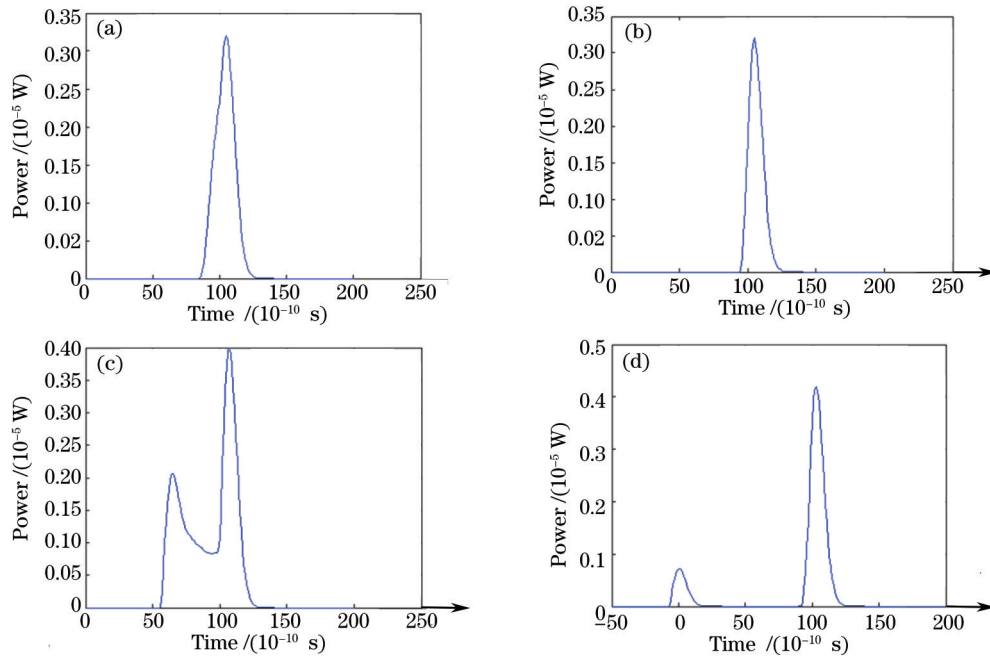


图 12 目标场景的回波。光斑 A; (b)光斑 B; (c)光斑 C; (d)光斑 D

Fig.12 Echo of target scene. (a) Light spot A; (b) light sport B; (c) light spot C; (d) light spot D

深入研究整个场景的激光回波波形后发现:

- 1) 遮蔽物与目标由于距离的不同,会各自形成激光回波,当两者距离较近时,两个激光回波会发生重叠相加的情况;
- 2) 同一目标场景内,回波的时间信息主要由发射激光的行进距离决定。但有些复杂的目标面型将引起回波的不同种类的变形,为激光回波的距离信息提取增加难度;
- 3) 激光回波的幅度信息由目标反射率、目标距离、大气透过率等诸多因素共同决定;
- 4) 回波的形状信息由目标面型和激光入射角度所决定。

综上所述,激光回波除了携带目标的距离信息,还至少携带了目标面型和目标反射率两种信息,如何利用激光回波更好的探测识别遮蔽物下的目标还有待深入研究。

4 结 论

研究了针对于复杂场景的机载扫描式全波形雷达系统仿真建模的全过程,并结合实际分析了激光回波的数学计算模型。根据该模型,提出了基于坐标变换的光线行进距离方法,相比于光线追迹方法省去了复杂的迭代运算,更适用于大规模复杂场景的建模仿真。基于此方法,阐述了目标与遮蔽物的建模方式、激光光斑的采样方法和光线行进距离的求解步骤,并给出了相应的实验结果。由实际场景的实验结果可知,目标面型会引起激光回波的不同变形情况,而遮蔽物信息也可以在回波波形中体现,因此如何利用该信息将作为下一步的工作重点。

参考文献

- 1 He Weiji, Sima Boyu, Miao Zhuang, *et al.*. Correction of reversal errors in photon counting 3D imaging lidar [J]. *Optics Precision Engineering*, 2013, 21(10): 2488-2494.
何伟基, 司马博羽, 苗 壮, 等. 光子计数三维成像激光雷达反转误差的校正[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2488-2494.
- 2 Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min, *et al.*. Three dimensional orientation estimation for lidar target [J]. *Optics Precision Engineering*, 2012, 5(20): 843-850.
郭裕兰, 万建伟, 鲁 敏, 等. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. *光学精密工程*, 2012, 5(20): 843-850.
- 3 Qu Yi. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 834-840.
曲 艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 834-840.
- 4 Chen Tao, Zhao Yujie, Liu Dong, *et al.*. Inversion of micro-plise lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0514001.
陈 涛, 赵玉洁, 刘 东, 等. 微脉冲激光雷达探测大气气溶胶标定反演新方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0514001.
- 5 He Tao, Huo Lujian, Lü Bo, *et al.*. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0113001.
何 涛, 侯鲁健, 吕 波, 等. 激光雷达探测反演PM2.5浓度的精度研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0113001.
- 6 Li Li, Wang Canzhao, Xie Yafeng, *et al.*. Wind field inversion technique for scanning wind lidar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 251-258.
李 丽, 王灿召, 谢亚峰, 等. 扫描式测风激光雷达的风场反演[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 251-258.
- 7 Zhang Qingyuan, Li Li, Li Quanxi, *et al.*. Comprehensive information processing system of helicopter anticollision laser radar [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 80-87.
张清源, 李 丽, 李全熙, 等. 直升机防撞激光雷达综合信息处理系统[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 80-87.
- 8 D Ludwig, A Kongable, S Krywick, *et al.*. Identifying targets under trees-jigsaw 3D-ladar test results [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2003: 16-26.
- 9 O Steinvall, H Larsson, F Gustafsson, *et al.*. Performance of 3D laser radar through vegetation and camouflage [C]. *Defense and Security, International Society for Optics and Photonics*, 2005: 129-142.
- 10 T Carlsson, O Steinvall, D Letalick. Signature simulation and signal analysis of 3D laser [J]. *Month*, 2001, 4: C4ISR.
- 11 Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242-247.
屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 242-247.
- 12 Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, *et al.*. Advances in foreign simulation softwares of imaging laser radar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010004.
韩 意, 孙华燕, 李迎春, 等. 国外成像激光雷达系统仿真软件研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010004.
- 13 O Steinvall. Effects of target shape and reflection on laser radar cross section [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(24): 4381-4391.
- 14 Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628002.
赵明波, 何 峻, 付 强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628002.
- 15 O Steinvall, H Larsson, F Gustafsson. Characterizing targets and backgrounds for 3D laser radars [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2004: 51-66.
- 16 S Budge, B Leishman, R P Scott. Simulation and modeling of return waveforms from a lidar beam footprint in USU LadarSIM [C]. *International Society for Optics and Photonics*, 2006: 62140N.

栏目编辑: 苏 岑