

# 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析

赵明波<sup>1,2</sup> 何 峻<sup>1</sup> 付 强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 国防科技大学电子科学与工程学院自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073)

<sup>2</sup> 中国人民解放军 93246 部队, 吉林 长春 130051

**摘要** 全波形回波信号建模仿真与分析是全波形激光雷达探测技术的一项重要研究内容。针对激光束在目标场景中投影点的获取问题,提出了一种基于激光束空间边界的光线求交快速算法,运算效率高,稳定性好。基于激光雷达信号的时空分布特性,推算出目标场景对信号的响应函数,建立二者的作用过程模型。并针对全回波检测技术中的距离选通探测模式,对目标回波信号与距离选通门限的位置关系进行了分类建模和分析。在研究以上三项关键技术的基础上,构建了全波形激光雷达回波信号仿真系统,仿真实现和分析了不同距离选通门限条件下的全波形回波信号特性,并生成了复杂场景下隐蔽目标的全波形激光雷达数据。

**关键词** 激光技术;激光雷达;全波形;建模仿真;光线求交;距离选通

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0628002

## Simulation Modeling and Analysis of Full-Waveform Ladar Signatures

Zhao Mingbo<sup>1,2</sup> He Jun<sup>1</sup> Fu Qiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Automatic Target Recognition Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China  
<sup>2</sup> No.93246 Troop, People's Liberation Army, Changchun, Jilin 130051, China)

**Abstract** Simulation modeling and analysis of full-waveform echo signals is an important research content of full-waveform ladar detection technology. For obtaining projection points of the laser beam in the target scene, a novel ray intersection fast algorithm based on the space boundary of the laser beam is proposed, which has high computing efficiency and robustness. Based on the spatial and temporal distribution characteristics of ladar signal, the response function of its projection points in the target scene is calculated, and the interaction between the ladar signal and target scene is also modeled. For full-waveform detection of range-gated mode, classified modeling and analysis of the positional relationship between echo signal and range-gated threshold are implemented. A full-waveform ladar echo signal simulation system is constructed on the basis of the three key technologies. Full-waveform characteristics of the echo signal under different range-gated thresholds are simulated and analyzed, and full-waveform ladar data of the hidden target in a complex scene is also produced.

**Key words** laser technique; ladar; full-waveform; simulation modeling; ray intersection; range-gated

**OCIS codes** 280.3400; 280.3640; 110.6880; 150.6910; 350.7420

## 1 引 言

激光成像雷达探测技术能够获取目标场景的高精度角度-角度-距离像、强度像和多普勒像等信息<sup>[1,2]</sup>,在大气监测、森林植被勘测、三维(3D)城市

建模、地形测绘与可视化、机器人导航和电力线检测等民用领域和战场侦察、精确制导等军事领域获得了广泛应用和迅速发展。目前,大多数激光成像雷达设备仅能探测目标场景的首个或最后一个回波脉

收稿日期: 2011-11-21; 收到修改稿日期: 2012-01-17

**作者简介:** 赵明波(1983—),男,博士研究生,主要从事精确制导与目标识别、激光雷达图像处理、目标检测与识别等方面的研究。E-mail: zhmb831019@163.com

**导师简介:** 付 强(1962—),男,博士,教授,主要从事精确制导与目标识别、雷达信号处理等方面的研究。

E-mail: fuqiang1962@vip.sina.com

冲,在面临森林、城市和隐蔽目标等多个距离层次都存在回波信号的复杂场景时存在较大局限性<sup>[3,4]</sup>。如果能够获得激光发射信号在不同距离层次的回波信号,实现全波形检测,则可以较大程度上提高激光雷达的探测能力和场景适用性<sup>[5]</sup>。目前虽然有少部分激光成像雷达设备一定程度上具备了全波形检测能力,例如奥地利 Reigl 公司生产的 LPM-321、VZ-400、VMX-250 等 3D 激光测量系统,但这些设备大都价格昂贵,不利于开展全波形激光雷达回波信号数据的采集、分析和处理,因此,开展全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析等方面的研究对全波形检测技术的发展具有重要意义。

关于激光成像雷达建模仿真方面,国外已开展了广泛研究,较为成功的主要有:瑞典国防研究局开发的激光 3D 成像仿真模型<sup>[6,7]</sup>;美国洛克希德·马丁公司开发的高级激光雷达信号仿真软件 (ALASS)<sup>[8]</sup>;林肯实验室针对其“竖锯”激光成像雷达开发的 3D 激光雷达仿真系统<sup>[9]</sup>;犹他州立大学开发的激光雷达回波仿真软件 USU LadarSIM<sup>[10]</sup>等。但是,这些仿真系统大多用于测试激光成像雷达系统的整体性能和工作参数,没有专门针对全波形激光雷达回波信号进行建模仿真,且无法获取详细资料。澳大利亚的 Graham 等<sup>[11,12]</sup>虽然对激光雷达植被穿透特性进行了建模仿真,但其主要集中于研究运载平台的运动轨迹对成像结果的影响,没有对激光束与目标场景的作用过程进行详细建模。德国的 Jutzi 等<sup>[13,14]</sup>在一定程度上描述了全波形检测技术的重要性并进行了仿真建模,但其主要集中于回波信号“相关检测”算法的研究;美国的 Kim<sup>[15]</sup>也进行了全波形激光雷达的建模仿真研究,但其主要集中于树木等植被的 3D 建模和反射特性研究。国内虽然也在一定程度上开展了激光成像雷达系统的建模仿真研究<sup>[16~18]</sup>,但大都是对简单目标或特殊成像体制<sup>[19~21]</sup>的建模仿真,有待进一步深入,且涉及到全波形激光雷达回波信号建模仿真的研究鲜有报道。

根据激光成像雷达的基本探测原理,要实现全波形回波信号的建模仿真,除需要完成激光雷达信号与目标场景的作用过程建模外,首先需要解决的问题就是激光束在目标场景中的投影点获取问题。文献[6~9]在解决这一问题时大都采用整个目标场景向成像平面映射的方法,这种方法不利于观察指定激光束的作用过程和成像效果,且与激光信号的实际作用过程不相符,在成像面不连续(运动扫描成像)的情况下显得无能为力。文献[11,12]在考虑运动载体

的情况下采用光线追踪法获取激光束在目标场景中的投影点,但其采用的是体素表示法的目标场景模型,与面元表示模型的光线求交方法不同,且并没有对每个激光束进行细分,不需过多考虑计算效率问题,不适于本文情况。因此,如何快速有效地获取激光束在目标场景中的投影点是迫切需要解决的问题。其次,在激光束探测方向的多个距离层次上都存在物体时,距离选通探测模式是获取指定距离范围内目标场景回波信号的关键技术<sup>[22,23]</sup>,可以有效解决稀疏障碍物的遮挡问题和背景干扰,但在目前的全波形激光雷达回波信号建模仿真研究中却并没有明确提到,都是获取观测方向上所有距离层次上的目标回波信号,这与实际情况是不符的。因此,对距离选通探测模式进行建模仿真是需要解决的另一重要问题。

针对以上问题,结合激光成像雷达的基本探测原理,展开对全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析的研究。首先解决激光束在目标场景中投影点的获取问题,准确获取投影点及其距离、反射率、入射角等相关信息;随后,利用获取的激光束投影点信息,对激光雷达信号与目标场景的作用过程进行建模;得到目标场景的回波信号后一般需要采取距离选通探测模式进行回波检测,对回波信号与距离选通门限可能出现的位置关系进行了分类建模和分析;在解决以上三项关键技术的基础上,建立全波形激光雷达回波信号仿真系统,对全波形回波信号进行了仿真实现与分析,并生成了全波形检测条件下复杂目标场景隐蔽目标的激光雷达数据,验证了所建的仿真模型,为进一步开展复杂场景下激光成像雷达检测、识别隐蔽目标提供了基础和条件。

## 2 激光束在目标场景中投影点的获取方法

在激光成像雷达的仿真过程中,一般需要获得每束激光在目标场景中的投影点,为了提高仿真的逼真度,还需要把激光束进行细分。把一束激光细分为  $N \times N$  条子光线,通过计算每条子光线与目标场景模型最近的交点,即可获得当前激光束在目标场景中  $N \times N$  投影点组成的光斑。获取相应投影点的目标场景信息(距激光源的距离、表面反射率、子光线相对于表面法线的入射角等),就可以进一步完成激光雷达信号与目标场景的作用过程建模。如图 1 所示,把激光束细分为  $10 \times 10$  的子光线,求得

每条子光线与目标场景模型最近的交点;图中五角星表示激光源的位置,黑色点表示交点的位置,黑色射线为激光束的子光线。

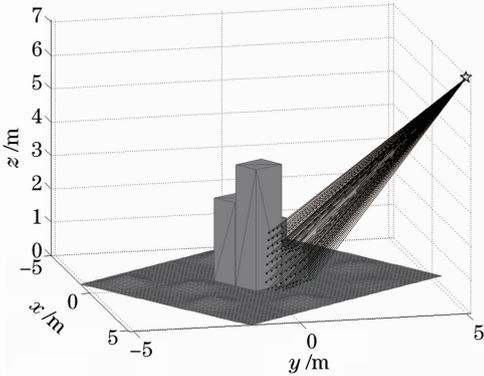


图1 激光束与子光线示意图

Fig.1 Illustration of laser beam and sub-rays

## 2.1 问题描述

通过前面的分析可知,要获取激光束在目标场景中的投影点,进而完成激光雷达信号与目标场景的作用过程建模,首先需要解决的问题是激光束子光线与目标场景的求交问题。目标场景模型全部通过3DS MAX软件建模,每个模型都由多个三角形面元组成,激光束子光线与目标场景的求交问题也就是子光线与三角形面元求交。光线与多边形求交是计算机图形学中的基础问题,可以通过光线与多边形的方程联立求解解决<sup>[24,25]</sup>。但是,由于目标场景模型中的面元数量众多,每条子光线与每个面元均需要进行求交运算。假如目标场景模型由1000个面元组成,激光束细分为 $10 \times 10$ 的子光线,获取激光束的投影点就需要 $1000 \times 10 \times 10 = 10^5$ 次求交运算,计算量巨大,因此必须解决光线求交的计算效率问题。

激光束与目标场景的求交问题与计算机图形学中的经典算法——光线追踪法类似,不同之处是仅需要计算光线与目标场景的第一次相交运算,不需要追踪反射光进行多层相交运算。目前解决光线追踪法计算效率问题的途径主要有<sup>[26,27]</sup>:1)提高求交速度;2)减少求交次数;3)减少光线条数;4)采用并行算法,其主要代表技术有空间剖分技术和光线相关性技术两种。这些算法主要应用于计算机图形学中的场景渲染问题,操作复杂,不易直接应用于激光束与复杂场景的求交问题,例如前者需要对目标场景进行复杂的空间包围盒划分和树搜索运算;后者需要建立复杂的光线树并对光线进行分类。但其空间剖分和光线相关的思想却是可以借鉴的,结合激

光束与目标场景求交的实际情况,这里提出一种基于激光束空间边界的光线求交快速算法。

## 2.2 基于激光束空间边界的光线求交快速算法

由于在激光成像雷达的仿真过程中,每束激光的子光线仅与目标场景中很小一部分面元相交,如果能在每条子光线与目标场景求交之前,先判断哪些面元处于当前激光束的观测范围内,或者哪些面元可能与当前激光束内的子光线相交,那么就能较大程度上提高光线求交的速度。

如图1所示,假设每束激光的观测区域为激光源和4条最边缘的子光线构成的四棱锥,那么只要判断哪些面元可能位于该四棱锥的观测范围内即可。由激光源的位置和4条最边缘的子光线可以确定该四棱锥的4个边界面,目标场景中的三角形面元与激光束的四棱锥观测区域可能存在以下几种位置关系:

1) 面元完全处于四棱锥观测区域内(3个顶点全在内部,如图2中的A);2) 面元部分处于四棱锥观测区域内(1个或2个顶点位于内部,如图2中的B);3) 面元被四棱锥观测区域穿过(3个顶点全在外部,但有部分面元处于观测区域内,如图2中的C);4) 面元部分可能处于观测区域内(3个顶点全在外部并分列于某边界面两侧,但有部分面元可能处于观测区域内,如图2中的D,向左移动,部分面元位于观测区域内,向右移动,则全部位于观测区域外);5) 面元完全处于观测区域外(3个顶点全位于某边界面外侧,如图2中的E)。

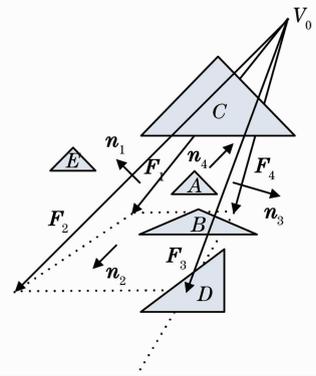


图2 激光束观测区域与三角形面元的位置关系示意图

Fig.2 Position relation of the laser beam observation volume and triangular elements

显然,第5种情况E完全处于激光束的观测范围外,与激光束内的子光线不可能存在交点,根据三角形面元的顶点与四棱锥观测区域的位置关系是完全可以剔除的。步骤如下:

1) 通过激光源的位置( $V_0$ )和 4 条边界光线的方向矢量  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3, \mathbf{F}_4$  确定 4 个观测区域边界平

面的方程和法线向量:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z = d_1, & \mathbf{n}_1 = \mathbf{F}_1 \times \mathbf{F}_2 = [a_1 \ b_1 \ c_1]^T \\ a_2x + b_2y + c_2z = d_2, & \mathbf{n}_2 = \mathbf{F}_2 \times \mathbf{F}_3 = [a_2 \ b_2 \ c_2]^T \\ a_3x + b_3y + c_3z = d_3, & \mathbf{n}_3 = \mathbf{F}_3 \times \mathbf{F}_4 = [a_3 \ b_3 \ c_3]^T \\ a_4x + b_4y + c_4z = d_4, & \mathbf{n}_4 = \mathbf{F}_4 \times \mathbf{F}_1 = [a_4 \ b_4 \ c_4]^T \end{cases} \quad (1)$$

2) 确定点  $(x_0, y_0, z_0)^T$  与平面  $a_ix + b_iy + c_iz = d_i (i = 1, \dots, 4)$  的位置关系, 当点位于包含法线向量的半空间(正半空间)时:

$$a_ix_0 + b_iy_0 + c_iz_0 - d_i > 0. \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (2)$$

假设某三角形面元的三个顶点坐标矩阵为

$$\mathbf{V}_{\text{face}} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则可以判断该三角形面元的三个顶点与激光束四个边界平面的位置关系:

$$\mathbf{M} = \mathbf{V}_{\text{face}}^T \cdot \mathbf{N} - \mathbf{D} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

3) 判断三角形面元与激光束四棱锥观测区域的位置关系。 $\mathbf{M}$  为  $3 \times 4$  的矩阵, 用  $\mathbf{M}(i, j)$  来表示顶点  $i$  与边界面  $j$  的位置关系, 如果  $\mathbf{M}(i, j) > 0$ , 则顶点  $i$  位于边界面  $j$  的正半空间。若矩阵  $\mathbf{M}$  中存在某一行全都大于零, 则说明该面元至少位于某一边界面的正半空间, 属于三角形面元与激光束观测区域位置关系中的第 5 种情况, 应该剔除。

4) 对于保留下来的面元, 按照经典光线求交算法求得每条子光线与面元的交点。

利用上述方法只能剔除第 5 种情况的面元, 但由于在实际目标场景模型中, 面元一般较小, 对于激光束的观测区域, 大部分需要剔除的都属于第 5 种情况。按照前面的分析, 第 4 种情况有部分也是应该剔除的, 但其与观测区域的位置关系相对复杂, 无

法用简单的方法进行剔除, 但这种情况一般仅占很少一部分, 可以按可能存在相交点的情况保留。

### 2.3 仿真实验与验证

按照 2.2 节的基于激光束空间边界的光线求交快速算法, 获取激光束在目标场景中的投影点, 采用 Matlab 2007b 软件编程, 进行程序仿真实验与验证(图 3)。

设置激光雷达传感器距目标场景坐标原点的距离均为 1000 m, 激光束中心方向相对于目标场景坐标系的俯仰角  $45^\circ$ , 方位角  $45^\circ$ , 激光束的束散角为 0.2 mrad, 把激光束细分为  $30 \times 30$  的子光线。通过设置不同的目标场景模型, 记录运算时间, 并与传统光线求交算法对比, 如表 1 所示。

通过表 1 中的实验结果看出: 采用快速算法后,

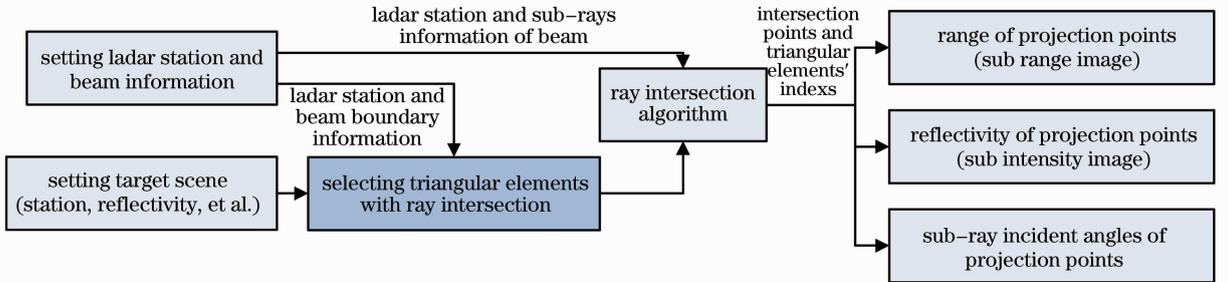


图 3 获取激光束在目标场景中投影点的程序仿真流程图

Fig. 3 Simulation program flow chart of obtaining projection points of the laser beam in the target scene

激光束与目标场景模型求交运算的时间显著减少；且与目标场景模型中的面元总数关系不大，主要决定于激光束内参与光线求交运算的面元数量；而传统求交算法的运算时间则主要决定于目标场景模型

的面元总数。可见，本文提出的基于激光束空间边界的光线求交快速算法具有较高的运算效率和较好的稳定性。

表 1 激光束与目标场景模型求交运算时间统计表

Table 1 Computation time statistics of the intersection between laser beam and target scene model

Target scene model	Total number of triangular elements	Number of triangular elements with intersection	Running time of traditional algorithm unit /s	Running time of fast algorithm unit /s
C97 tank	4868	34	14.8818	0.1934
Microbus	2400	30	4.4937	0.1170
F16 plane	12558	48	84.7699	0.2172
M1 tank	1662	117	2.8659	0.2195
M2 tank	998	71	1.6880	0.1538
M3 crawler lorry	1684	17	2.8316	0.0684
T80 tank	4202	38	12.1145	0.1217

## 2.4 激光束投影点相关信息的获取

获得激光束在目标场景中的投影点后，经过简单运算即可得到投影点的相关信息(图 3)。参与激光雷达信号与目标场景作用过程建模的主要包括投影点距激光源的距离、表面反射率、子光线相对于目标场景表面法线的入射角，为方便表述，定义激光束投影点距激光源的距离为子距离像，投影点表面反射率为子强度像。

构建由地面模型和 4 个 box 模型组成的目标场

景模型[如图 4(a)]；为表述算法对目标场景的距离和反射率信息的获取能力，4 个方块高度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m；按从高到低，反射率分别设为 0.5、0.4、0.3、0.2，地面反射率为 0.1；激光束中心方向相对于目标场景坐标系的俯仰角  $90^\circ$ ，方位角  $0^\circ$ ；其他参数同 2.3 节，得到如图 4 的仿真结果。其中图 4(a)中为激光束在目标场景中的投影点，分布于 4 个不同的方块顶部，同时获取了 4 个不同目标的相关信息；图 4(b)为子距离像，准确表示了不同

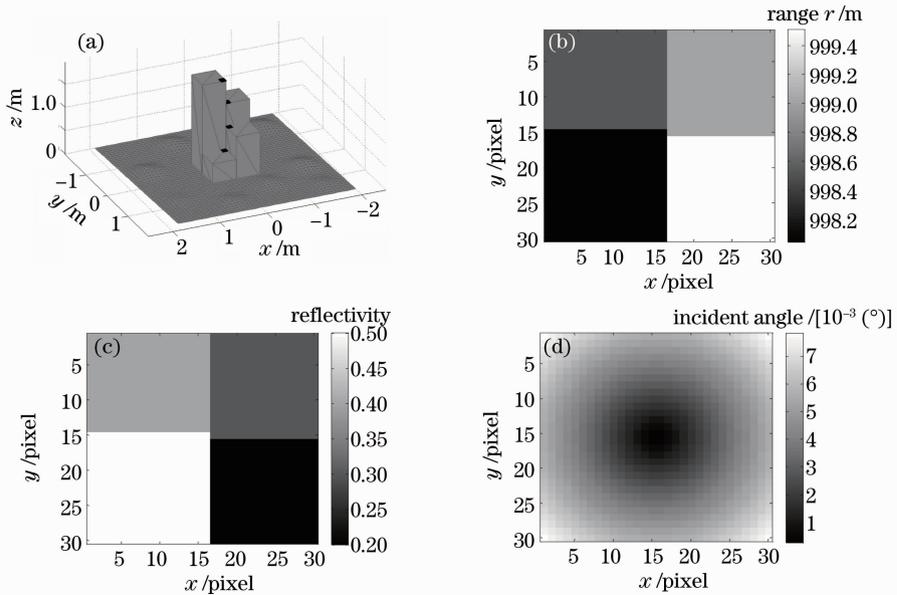


图 4 激光束在目标场景中的(a)投影点及,(b)子距离像,(c)子强度像和(d)子光线入射角

Fig. 4 (a) Projection points, (b) sub range image, (c) sub intensity image and (d) sub-ray incident angle of laser beam in the target scene

目标距激光源的距离;图 4(c)为子强度像,准确表示了不同目标的反射率;图 4(d)为子光线的入射角,准确反映了每条子光线的入射角,由于激光束中心方向的俯仰角为  $90^\circ$ ,近似于垂直入射,因此入射角普遍较小。图 4(b)~(d)中的横纵坐标为图像像素坐标,对应于各个投影点。

### 3 激光雷达信号与目标场景的作用过程建模

激光雷达信号与目标场景的作用过程建模是激光成像雷达系统仿真的核心,把每束激光在目标场

景表面的投影区域看作一个激光脚印<sup>[6,10,28]</sup>,其对应的回波合成距离像上的一个像素  $P_p$ ,经过波形分析与处理,可获得其对应的距离值  $d_p$ 。每个激光脚印由  $N \times N$  个小面元组成如图 5 所示<sup>[28]</sup>,与激光束在目标场景中的投影点相对应。由于激光雷达信号的时空分布函数为

$$U(x, y, z) = I_0 p(t) I(x, y), \quad (5)$$

式中  $I_0$  表示单个激光发射脉冲的能量,  $p(t)$  为时间分布函数,  $I(x, y)$  为空间分布函数。因此,可以把激光雷达信号与目标场景的作用过程分别从时间域和空间域来考虑。

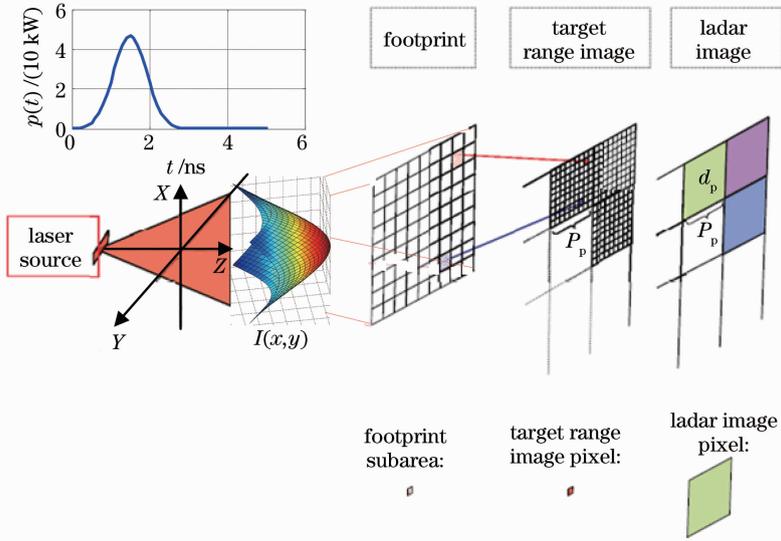


图 5 激光雷达信号作用过程示意图

Fig. 5 Illustration of the lidar signal interaction

1) 考虑当前激光束中的某一子光线  $r_{ray}(x, y)$ , ( $x = 1, \dots, N, y = 1, \dots, N$ ), 其对应于激光脚印的子面元  $S_{subarea}(x, y)$  处。如图 5 所示, 定义整个激光脚印对应的观测区域的子距离像为  $R(x, y)$ , 子强度像为  $I_{intensity}(x, y)$ , 子光线入射角矩阵为  $A_n(x, y)$ 。根据激光雷达距离(7)式, 对应于每个子面元的观测距离和反射率, 得到子面元  $S_{subarea}(x, y)$  对激光雷达信号的响应函数为

$$h_p(x, y, t) = K_t K_r D^2 T_a^2 \eta_{\text{sys}} \frac{I(x, y) I_{intensity}(x, y)}{4R(x, y)^2} \times \delta \left[ t - \frac{2R(x, y)}{c} \right], \quad (6)$$

式中  $x = 1, \dots, N, y = 1, \dots, N$  为子面元在激光脚印中的索引;  $\delta(t)$  为冲击函数。激光雷达距离方程为<sup>[28~30]</sup>

$$P_r = \frac{P_t K_t K_r \rho D^2}{4R^2} T_a^2 \eta_{\text{sys}}, \quad (7)$$

式中  $P_r$  为回波功率,  $P_t$  为激光雷达发射脉冲的功率,  $K_t$  为发射光学系统的透过率,  $K_r$  为接收光学系统的透过率,  $\rho$  为目标的反射率,  $D$  为激光雷达的接收孔径(直径),  $T_a$  为单程大气衰减指数,  $\eta_{\text{sys}}$  为接收系统的效率,  $R$  为观测距离。注意, 这里把每个子面元都看成是理想的漫反射面, 即朗伯面, 因此仅考虑其半球反射率, 没有把漫反射和镜面反射特性加于区分, 详细资料可参考文献[6, 7, 10]。

2) 考虑大气湍流和散斑效应对激光雷达回波信号的幅度调制<sup>[6, 8, 29]</sup>。假设当前激光束相对应的大气湍流引起的幅度起伏矩阵为  $S_{\text{turb}}$ , 散斑效应引起的幅度起伏矩阵为  $S_{\text{speckle}}$  ( $S_{\text{turb}}$ 、 $S_{\text{speckle}}$  均为  $N \times N$  矩阵, 如图 6 所示, 横纵坐标为矩阵坐标, 矩阵元素为强度值, 无量纲单位)。由于大气湍流和散斑效应引起的幅度起伏均为乘性噪声, 所以经大气湍流和散斑效应影响后得到子面元  $S_{subarea}(x, y)$  对激光雷达信号的响应函数为

$$h_p(x, y, t) = h_p(x, y, t)S_{\text{turb}}(x, y)S_{\text{speckle}}(x, y). \quad (8)$$

式中  $S_{\text{turb}}(x, y)$ 、 $S_{\text{speckle}}$  分别为  $\mathbf{S}_{\text{turb}}$ 、 $\mathbf{S}_{\text{speckle}}$  中  $(x, y)$  处的元素值,其分别对应于子光线  $r_{\text{ray}}(x, y)$  受到的大气湍流和散斑效应引起的幅度起伏。

3) 由于激光脚印的每个子面元对应的观测距

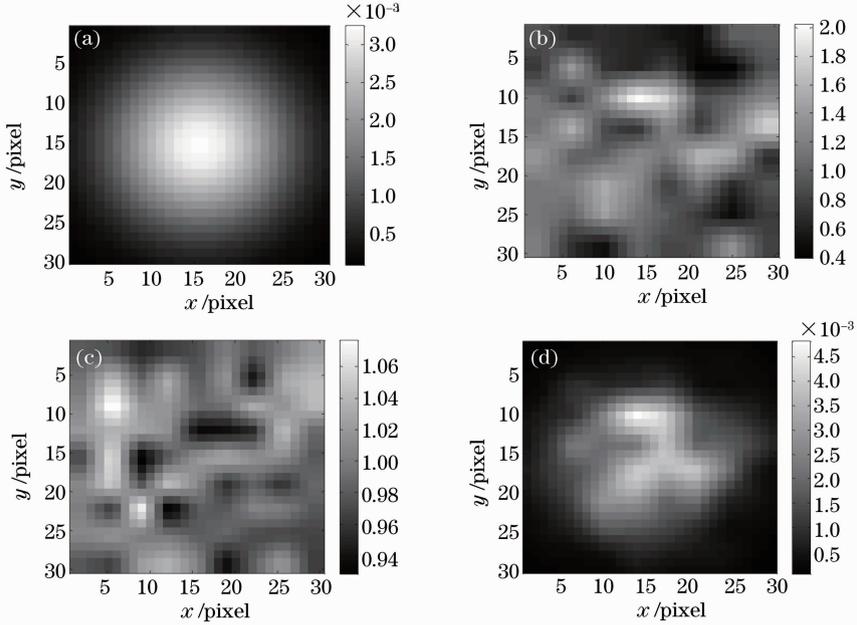


图 6 激光雷达信号作用过程中大气湍流和散斑效应引起的信号强度起伏。(a)脉冲空间分布;(b)大气湍流效应;(c)散斑效应;(d)影响后的脉冲空间分布

Fig. 6 Intensity fluctuations caused by atmospheric turbulence and speckle in the ladar signal transmission. (a) Spatial distribution of the pulse; (b) effect of atmospheric turbulence; (c) speckle pattern; (d) spatial distribution of the pulse after speckle and turbulence disturbances

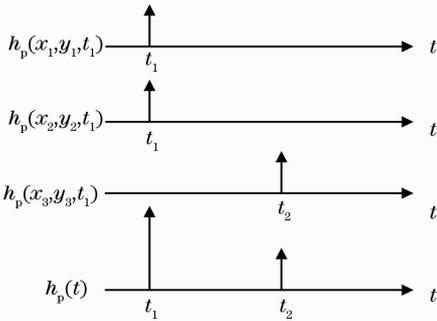


图 7 激光脚印响应函数叠加示意图

Fig. 7 Sum of the footprint response functions

4) 把当前激光束对应的激光脚印的响应函数  $h_p(t)$  与激光雷达发射信号的时间分布函数  $p(t)$  进行卷积运算,便可以得到该激光脚印对应的目标场景区域与激光雷达信号作用后返回激光雷达接收机的回波信号  $P_{P_p}^{\text{received}}(t)$  为

$$P_{P_p}^{\text{received}}(t) = h_p(t) * I_0 p(t) = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} h_p(\tau) p(t - \tau) d\tau. \quad (10)$$

离不同,因此其对应的响应时间也不同。根据激光雷达接收机 APD 的特性,对于响应时间相同的子面元的响应函数进行叠加(如图 7 所示),得到一个时间序列信号,即整个激光脚印的响应函数为

$$h_p(t) = \sum_{S_{\text{subarea}}(x, y), t=t_i} h_p(x, y, t_i). \quad (9)$$

图 8 中所示为激光雷达发射脉冲信号与图 4 中的激光束目标场景投影点作用前后的波形图,发射信号为高斯脉冲形状,且  $I_0 = 50 \mu\text{J}$ ,  $h_{\text{FWHM}} = 1 \text{ ns}$ 。从图 8(b)中可以看出,回波信号充分体现了图 4(a)中 4 个不同方块距激光源的距离差异,由于激光束相对于目标表面近似于垂直入射,回波信号中每一个起伏与发射信号波形非常相近,仅存在由于大气湍流和散斑造成的幅度起伏。

## 4 距离选通探测模式

距离选通探测模式是一种使距离计数器只在选通脉冲作用下才起作用,在其他时间内则处于关闭状态的工作方式。现代激光雷达系统通常都采用距离选通来抑制近距离的后向散射和全程测距中进入到放大器的各种干扰,提高测距系统抗干扰能力和工作的可靠性。距离选通门电路一般有三种(图 9)<sup>[31]</sup>,即克服后向散射距离门,激光全程距离门和回波信号选通脉冲距离门。

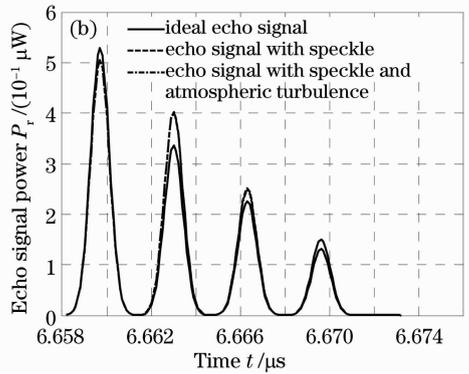
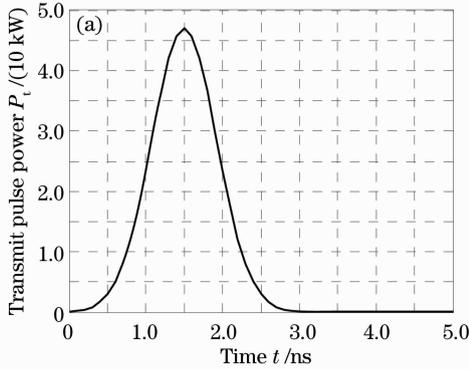


图 8 激光雷达信号与目标场景作用前后的脉冲波形。(a)发射脉冲信号；(b)与目标场景作用后的回波波形  
Fig. 8 Waveforms before and after the interaction of the ladar signal and target scene. (a) Transmit pulse signal;  
(b) echo signal after the interaction

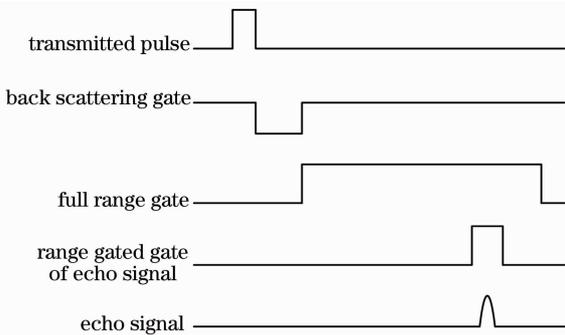


图 9 距离选通探测模式示意图

Fig. 9 Illustration of the range-gated detection mode

距离选通探测模式是实现激光雷达回波信号全波形检测的主要技术之一<sup>[32]</sup>,现在应用较多的主要是第三种,通过这种技术可仅探测障碍物后的目标,实现伪装网、百叶窗、烟雾、稀疏树林等障碍物的排除;同样,利用该项技术还可以提取预定距离范围内的相关目标信息,实现电力线检测、直升机蔽障、机器人导航等。这里主要结合第三种方式进行讨论和实现。

在实际处理过程中,可能预先并不知道目标(希望探测到的物体)回波信号处于什么样的距离范围内,这时回波信号和距离选通范围就有可能产生错位的情况,即有可能探测不到目标信号或只探测到目标信号的一部分。因此,如何实现距离选通门限与目标回波信号的位置关系建模成为全波形激光雷达回波信号建模仿真中的关键技术之一。由于二者在时间域都有一定的长度,可能出现的位置关系多种多样,无法简单地用“包含或非包含”、“前或后”来表述,需要结合实际探测中二者的位置关系和建模仿真中的具体实现方法,进行分类建模和分析。首先,按照回波信号开始时间和距离选通门限开始时间的关系可分为两大类,即前者小于后者和前者大于后者;其次,在每一大类中考虑回波信号结束时间

与距离选通门限的位置关系,进一步细化可能出现的位置关系类型并涵盖全部可能性。这种方法既简单易实现,又能涵盖全部可能出现的位置关系,具体分类情况如下:

假设实际目标回波信号开始时间  $t_s$ , 结束时间  $t_e$ ; 距离选通门限对应的开始时间  $T_s$ , 结束时间  $T_e$ , 如图 10 所示。则它们的相互位置关系可能存在以下几种情况。

1) 回波信号开始时间小于距离选通门限开始时间时,即  $t_s \leq T_s$  [图 11(a)~(c)]。

(1)  $t_e \leq T_s$ , 回波信号结束时间小于距离选通门限开始时间 [图 11(a)];

(2)  $T_s < t_e \leq T_e$ , 回波信号结束时间大于距离选通门限开始时间, 小于距离选通门限结束时间 [图 11(b)];

(3)  $t_e > T_e$ , 回波信号结束时间大于距离选通门限结束时间 [图 11(c)]。

2) 回波信号开始时间大于距离选通门限开始时间时,即  $t_s > T_s$  [图 11(d)~(f)]。

(1)  $t_s \geq T_e$ , 回波信号开始时间大于距离选通门限结束时间 [图 11(d)];

(2)  $T_s < t_s < T_e$ , 回波信号开始时间大于距离选通门限开始时间, 小于距离选通门限结束时间 [图 11(e)];

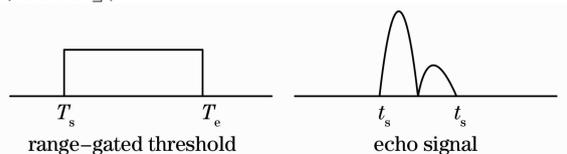


图 10 距离选通门限与回波信号示意图

Fig. 10 Illustration of the range-gated threshold and echo signal

(3)  $t_e \leq T_c$ , 回波信号结束时间小于距离选通 范围内[图 11(f)].  
 门限结束时间, 即回波信号完全处于距离选通门限

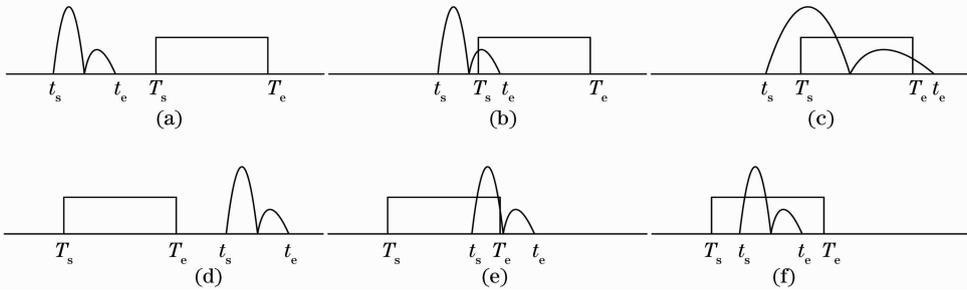


图 11 距离选通门限与回波信号的位置关系示意图。(a)  $t_s \leq T_s$  &  $t_e \leq T_s$ ; (b)  $t_s \leq T_s$  &  $T_s < t_e \leq T_c$ ;  
 (c)  $t_s \leq T_s$  &  $t_e > T_c$ ; (d)  $t_s > T_s$  &  $t_s \geq T_c$ ; (e)  $t_s > T_s$  &  $T_s < t_s < T_c$ ; (f)  $t_s > T_s$  &  $t_e \leq T_c$

Fig. 11 Positional relation between echo signal and range-gated threshold. (a)  $t_s \leq T_s$  &  $t_e \leq T_s$ ; (b)  $t_s \leq T_s$  &  $T_s < t_e \leq T_c$ ;  
 (c)  $t_s \leq T_s$  &  $t_e > T_c$ ; (d)  $t_s > T_s$  &  $t_s \geq T_c$ ; (e)  $t_s > T_s$  &  $T_s < t_s < T_c$ ; (f)  $t_s > T_s$  &  $t_e \leq T_c$

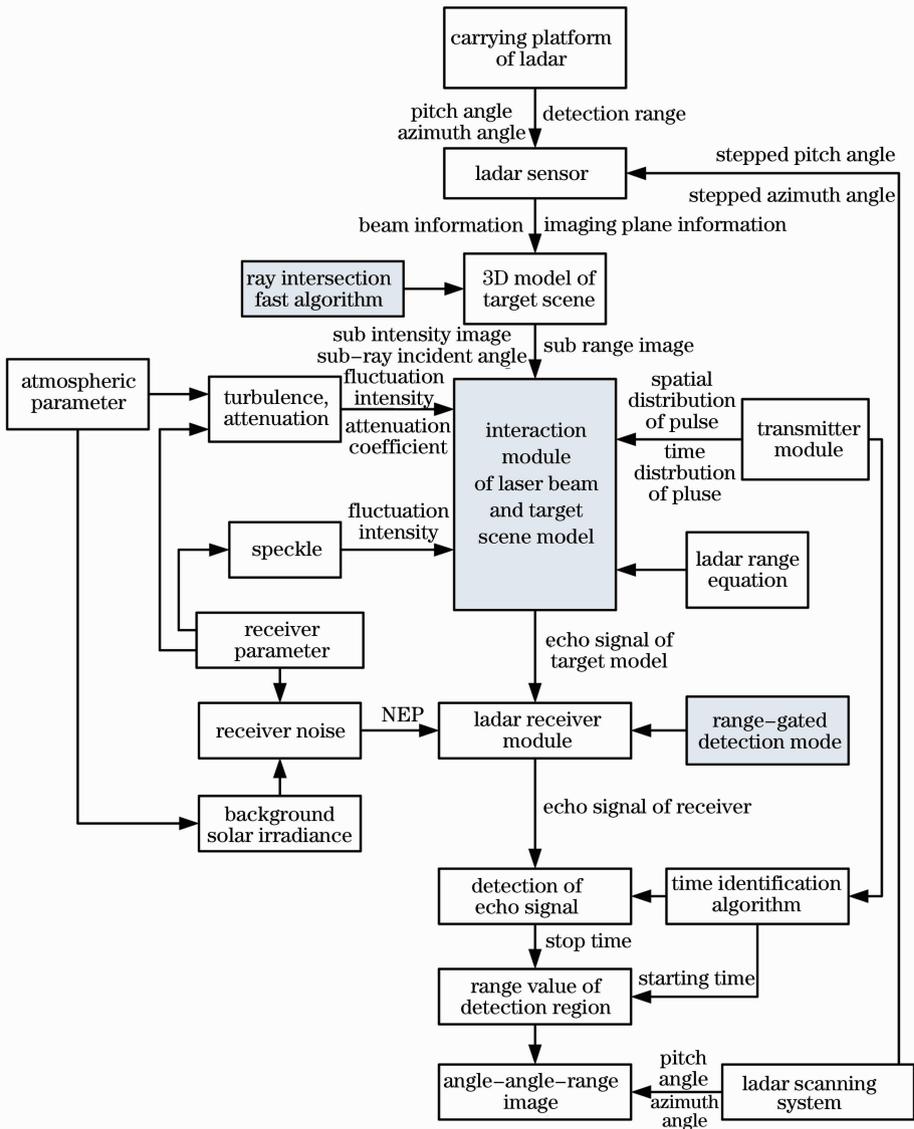


图 12 系统仿真流程图

Fig. 12 System simulation flow chart

## 5 全波形回波信号仿真实现与分析

### 5.1 系统仿真实现

通过进一步建立激光雷达成像系统的发射系统模型、大气传输模型、接收系统模型和时刻鉴别算法模型等,完成全波形激光雷达回波信号仿真系统(图12为系统仿真流程图),实现全波形激光雷达回波信号仿真与分析,并生成全波形检测条件下复杂目标场景隐蔽目标的激光雷达数据。

### 5.2 全波形回波信号仿真与分析

利用建立的全波形激光雷达回波信号仿真系统,结合可能出现的6种情况对全波形激光雷达回波信号进行仿真实现与分析。由于全波形激光雷达

的应用场合多种多样,不一一举例,这里依然采用2.4节中的简单目标场景模型,对应于不同的应用场合,根据4个方块与激光源的距离差异,可理解为不同距离层次上的目标或障碍物,例如,把底部方块作为目标,顶部的方块就是障碍物;把顶部方块作为目标,底部方块就是背景干扰;把位于中部的方块作为目标,顶部和底部的方块可分别理解为前景障碍物和背景干扰。图13中,图13(a)实曲线为回波信号,虚直线为探测阈值,“+”状点为峰值时刻鉴别法的检测结果,“\*”状点为最大值,并分别对应于图13(b)中的3D坐标点。

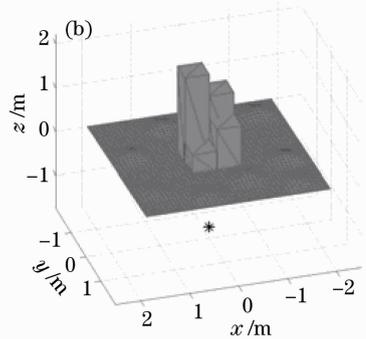
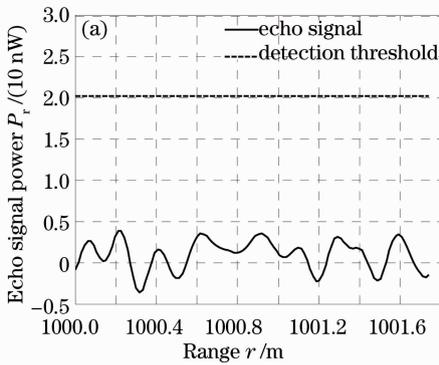


图 13  $t_s \leq T_s$  &  $t_e \leq T_s$  时的回波信号和检测结果

Fig. 13 Echo signal and detecting result when  $t_s \leq T_s$  &  $t_e \leq T_s$

1) 取距离选通门限为[1000 1001.5],其他仿真参数同2.4节,得到回波信号和检测结果如图13所示。可见,距离选通门限超过了目标回波信号的时间范围,无法检测到目标信号,实际探测中这种情况需要结合目标的先验信息进行避免。注意,当未检测到超过阈值的信号时(即出现失落信息),最后的距离值统一设置为距离选通门限的最大值。

2) 取距离选通门限为[999 1001],其他仿真参数同上,得到回波信号和检测结果如图14所示。可

见,由于距离选通门限只包含了回波信号尾部的时间范围,与图8(b)相比,仅检测到了目标的尾部部分信号。对于去除前景部分障碍物的情况可以用这种模式进行探测,例如探测伪装网、稀疏树林遮挡后的目标或地面高程等情况,有的采取直接从全回波信号中提取最后沿的脉冲回波来实现。

3) 取距离选通门限为[998.5 999.2],其他仿真参数同上,得到回波脉冲信号和检测结果如图15所示。可见,由于距离选通门限只包含了回波信号

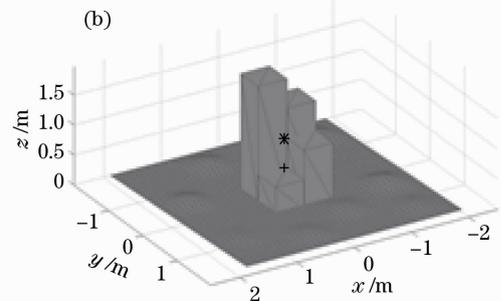
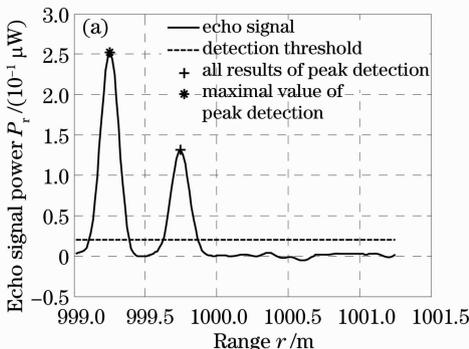


图 14  $t_s \leq T_s$  &  $T_s < t_e \leq T_e$  时的回波信号和检测结果

Fig. 14 Echo signal and detecting result when  $t_s \leq T_s$  &  $T_s < t_e \leq T_e$

中部的时间范围,与图 8(b)相比,仅检测到了目标的中部部分信号。对于去除前景、后景都存在障碍物,探测目标处于中间的情况可用这种模式,例如电

力线检测、隐蔽目标探测等,但这种情况距离选通门限一般不好控制,需要预先知道前后障碍物和目标所处的大概位置。

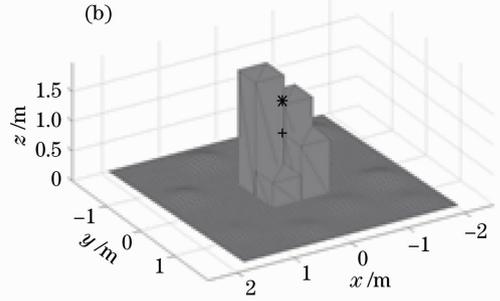
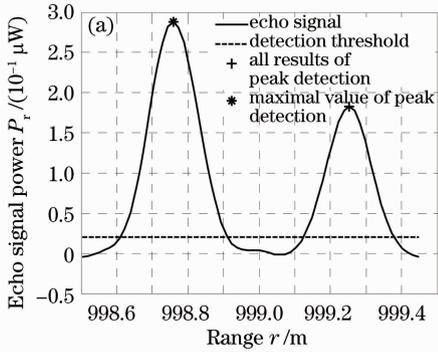


图 15  $t_s \leq T_s$  &  $t_e > T_e$  时的回波信号和检测结果

Fig. 15 Echo signal and detecting result when  $t_s \leq T_s$  &  $t_e > T_e$

4) 取距离选通门限为[996 997.5],其他仿真参数同上,得到回波信号和检测结果如图 16 所示,可见,距离选通门限在目标回波信号到来之前,无法检测到目标信号,实际探测中这种情况需要结合目

标的先验信息进行避免。

5) 取距离选通门限为[996 998.8],其他仿真参数同上,得到回波信号和检测结果如图17所示。

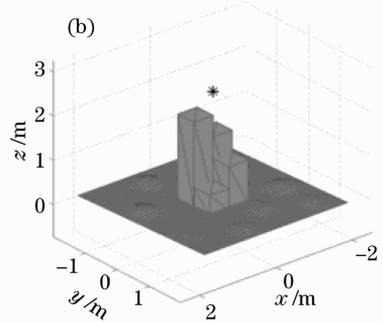
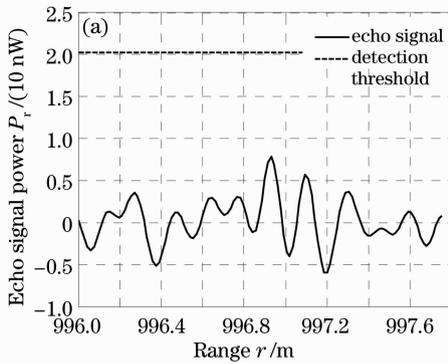


图 16  $t_s > T_s$  &  $t_s \geq T_e$  时的回波信号和检测结果

Fig. 16 Echo signal and detecting result when  $t_s > T_s$  &  $t_s \geq T_e$

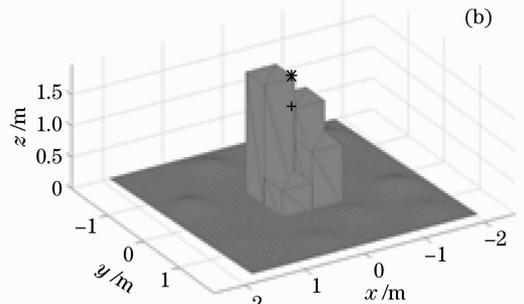
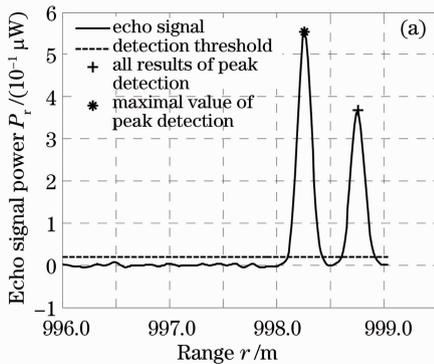
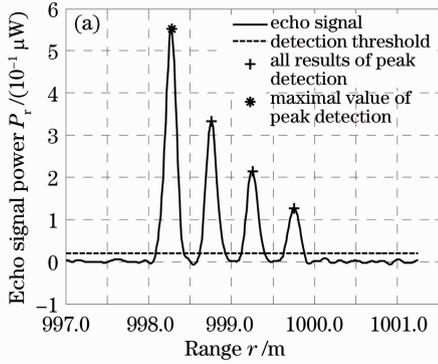


图 17  $t_s > T_s$  &  $T_s < t_s < T_e$  时的回波信号和检测结果

Fig. 17 Echo signal and detecting result when  $t_s > T_s$  &  $T_s < t_s < T_e$

可见,由于距离选通门限只包含了回波信号前部的时间范围,与图 8(b)相比,仅检测到了目标的前部部分信号。对于去除后景(背景)障碍物或干扰,仅探测表面部分目标的情况可以用这种模式进行探测,例如机器人导航、电力线检测(前面不存在障碍物)、城市表面建模等,有的采取直接从全回波信号中提取最前沿的脉冲回波来实现。

6) 取距离选通门限为[997 1001],其他仿真参数同上,得到回波信号和检测结果如图 18 所示。可



见,由于距离选通门限包含了回波信号的所有时间范围,因此,检测到了目标的所有信号。对于全波形检测可以用这种探测模式,例如森林植被勘测、全景建模、隐蔽目标探测等,这种探测模式的一个突出优点就是可以实现一个激光脉冲信号探测多个同方向的目标,得到的观测点密度明显增加,在不了解隐蔽目标的具体位置时可以用这种模式获得整个场景的观测点信息,然后再通过激光雷达数据相关处理方法获得希望探测目标的相关数据。

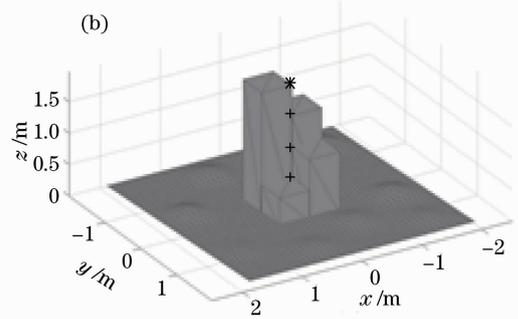


图 18  $t_s > T_s$  &  $t_e \leq T_e$  时的回波信号和检测结果

Fig. 18 Echo signal and detecting result when  $t_s > T_s$  &  $t_e \leq T_e$ .

### 5.3 全波形检测条件下的隐蔽目标成像

基于全波形激光雷达回波信号仿真系统,设置含隐蔽目标的复杂场景,生成全波形检测条件下的激光雷达探测数据(图 19),进一步验证全波形激光

雷达回波信号建模仿真方法,为研究复杂场景下隐蔽目标探测的激光雷达图像处理提供基础和条件。

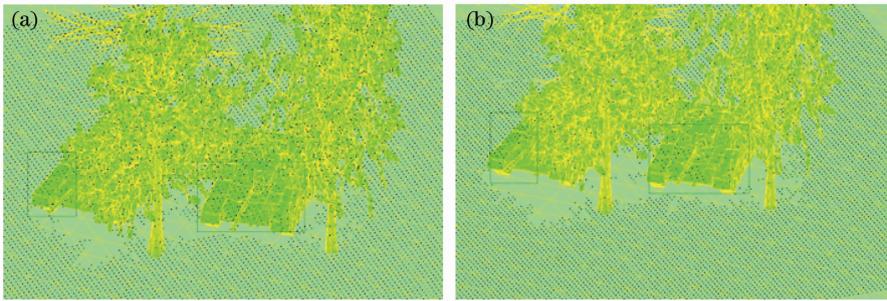


图 19 激光雷达点云数据。(a)全波形检测条件下;(b)仅探测回波脉冲最大值

Fig. 19 Ladar point cloud data. (a) Full-waveform detection; (b) only detecting the maximum peak of the echo pulse

图 19(a)、(b)分别为全波形检测条件下和传统的仅探测回波脉冲最大值方法获得的激光雷达探测数据。由于全波形检测条件下每个角度下均可能出现多个探测点,不方便用角度-角度-距离像表述,这里均是经过坐标转换后的 3D 点云图(这里仅剪切了主要包含目标的部分)。目标场景由地面背景、2 棵树和 2 辆隐藏在树后的坦克组成,成像分辨率为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ,经统计,在图 19(a)、(b)两种条件下得到的数据点数量分别为 20417 和

16384。可见,全波形探测条件下获得的数据点明显多于传统检测方法,获取的目标场景信息更多;另外从图中对应的两对矩形框中也可以看出,全波形检测条件下获得的隐蔽目标的数据点明显多于后者,这为隐蔽目标的检测、识别提供了更加丰富的数据。

## 6 结 论

针对当前全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析方面存在的问题,从激光束在目标场景中的投影点获取方法、激光雷达信号与目标场景的作用过

程建模、距离选通探测模式三个方面进行了重点研究和建模仿真。提出了一种基于激光束空间边界的光线求交快速算法；基于激光束投影点对激光雷达信号的响应函数，建立了激光雷达信号与目标场景的作用过程模型；对目标回波信号与距离选通门限可能出现的位置关系进行了分析与分类建模。最后，结合激光成像雷达的基本探测原理，构建了全波形激光雷达回波信号仿真系统，并对不同距离选通门限条件下的全波形回波信号进行了仿真实现与分析，生成了全波形检测条件下复杂目标场景隐蔽目标的激光雷达数据。

### 参 考 文 献

- Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001  
姜海娇, 来建成, 王春勇等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0514001
- Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian *et al.*. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908005  
周琴, 张秀达, 胡剑等. 凝视成像三维激光雷达噪声分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0908005
- B. Jutzi, U. Stilla. Characteristics of the measurement unit of a full-waveform [C]. Symposium of ISPRS Commission I: From Sensors to Imagery. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2006
- N. Vandapel, O. Amidi, J. R. Miller. Toward laser pulse waveform analysis for scene interpretation [C]. New Orleans: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 2004, **1**: 950~955
- O. Steinvall, H. Larsson, F. Gustafsson *et al.*. Performance of 3-D laser radar through vegetation and camouflage [C]. *SPIE*, 2005, **5792**: 129~142
- T. Carlsson, O. Steinvall, D. Letalick. Signature Simulation and Signal Analysis for 3-D Laser Radar [R]. Sweden: FOI-Swedish Defence Research Agency, 2001
- O. Steinvall, T. Carlsson. Three-dimensional laser radar modelling [C]. *SPIE*, 2001, **4377**: 23~34
- D. Jacob, P. Gatt, T. Nichols. Overview of LMCT's advanced lidar signal simulator (ALASS) [C]. *SPIE*, 2008, **6950**: 69500L
- M. E. O'Brien, D. G. Fouche. Simulation of 3D laser radar systems [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 37~60
- S. Budge, B. Leishman, R. Pack. Simulation and modeling of return waveforms from a lidar beam footprint in USU Lidar SIM [C]. *SPIE*, 2006, **6214**: 62140N
- M. Graham. Design of a Foliage Penetrating Lidar Simulation Tool [R]. Edinburgh: Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Division, DSTO (Defence Science and Technology Organisation), 2009
- D. T. Mewett, M. D. Graham, A. H. Davies. Testing flight paths for collecting 3D lidar imagery of inconspicuous targets [C]. Cairns: 18th World IMACS / MODSIM Congress, 2009. 1636~1642
- B. Jutzi, U. Stilla. Precise range estimation on known surfaces by analysis of full-waveform laser [C]. Symposium of ISPRS Commission III: Photogrammetric Computer Vision PCV06. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3), 2006. 234~239
- B. Jutzi, U. Stilla. Simulation and analysis of full-waveform laser data of urban objects [C]. Paris: 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, 2007. 1~5
- A. M. Kim. Simulation Full-Waveform Lidar [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2009
- Xue Guogang, Sun Dongsong, Yang Zhao. Modeling and performance simulation of direct detection laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(3): 244~247  
薛国刚, 孙东松, 杨昭. 直接探测激光雷达模型及其性能模拟[J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(3): 244~247
- Yi Xiang, Wang Weiran. Numerical simulation for lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 21~23  
易翔, 王蔚然. 激光雷达系统的数值仿真[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 21~23
- Ma Chaojie, Sun Xiaoquan, Li Xiaoxia. Simulation designing of imaging laser radar guidance system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(6): 655~659  
马超杰, 孙晓泉, 李晓霞. 基于激光成像雷达制导系统的仿真设计[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(6): 655~659
- Dai Pinjuan, Liu Guoguo, Wu Jin. Numerical simulation on synthetic aperture lidar imaging through atmospheric turbulence with phase gradient algorithm compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 739~746  
戴品娟, 刘国国, 吴谨. 大气湍流下合成孔径激光雷达成像数值模拟及PGA补偿[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 739~746
- Jin Xiaofeng, Sun Jianfeng, Yan Yi *et al.*. Small system simulation for reflective tomography laser radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 747~752  
金晓峰, 孙建锋, 严毅等. 反射层析激光雷达小系统成像模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 747~752
- Tang Meng, Zhao Yuan, Zhang Yu *et al.*. Simulation and experimental verification of gain-modulated scannerless lidar range image [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0414001  
唐勳, 赵远, 张宇等. 增益调制非扫描激光雷达距离像的仿真及实验验证[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0414001
- Wu Long, Zhao Yuan, Jin Chenfei *et al.*. Effects of changing threshold on detection probability of scannerless range-gated lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3117~3123  
吴龙, 赵远, 靳辰飞等. 变阈值检测对无扫描距离选通激光雷达探测概率的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3117~3123
- Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109001  
韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0109001
- A. Watt. 3D Computer Graphics (Third Edition) [M]. Bao Hong Transl.. Beijing: China Machine Press, 2005. 7  
A. Watt. 3D计算机图形学(第三版)[M]. 包宏译. 北京: 机械工业出版社, 2005. 7
- M. Slater, A. Steed, Y. Chrysanthou. Computer Graphics and Virtual Environments From Realism to Real-Time [M]. Cheng Cheng, Xu Yutian Transl.. Beijing: China Machine Press, 2004. 10  
M. Slater, A. Steed, Y. Chrysanthou. 计算机图形学与虚拟环境[M]. 程成, 徐玉田译. 北京: 机械工业出版社, 2004. 10
- Wang Wenxi, Xiao Shide, Meng Wen *et al.*. Ray tracing algorithm based on octree space partition method [J]. *Computer Applications*, 2008, **28**(3): 656~658  
王文玺, 肖世德, 孟文等. 一种基于八叉树空间剖分技术的光线跟踪算法[J]. *计算机应用*, 2008, **28**(3): 656~658
- Zhao Shuang, Li Xuejun. Algorithm of efficient ray tracing of complex scenes [J]. *Computer Engineering*, 2006, **32**(1): 224~225, 272

- 赵 爽, 李学军. 复杂场景的快速光线跟踪算法[J]. 计算机工程, 2006, **32**(1): 224~225, 272
- 28 E. Blanquer. Ladar Proximity Fuze-System Study [D]. Stockholm: the Royal Institute of Technology of Stockholm, 2007
- 29 S. Der, B. Redman, R. Chellappa. Simulation of Error in Optical Radar Range Measurements [R]. Army Research Laboratory, 1998. 1~25
- 30 Dai Yongjiang. Laser Radar Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 11
- 戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 11
- 31 Xiong Fenghui. Laser Radar [M]. Beijing: Astronautics Press, 1994. 4
- 熊辉丰. 激光雷达[M]. 北京: 宇航出版社, 1994. 4
- 32 O. Steinvall, P. Andersson, M. Elmqvist *et al.*. Overview of range gated imaging at FOI [C]. *SPIE*, 2007, **6242**: 624216

栏目编辑: 李文喆