

基于相似度评估的激光雷达回波场景生成优化

王姣姣^{1,2}, 王欣^{1,2*}, 高彦泽^{1,2}, 李卓^{1,2}, 杨苏辉^{1,2}, 张金英^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

摘要 基于三维场景构建和激光散射原理的激光雷达回波场景生成, 可被用于模拟真实场景的激光回波特性, 是激光阵列探测器性能测试的重要手段。为了高效地生成具有高仿真精度的动态场景, 构建了由激光回波场景仿真相似度和场景计算耗时组成的采纳度并将其作为评价函数, 实现了对激光回波场景空间网格划分数的优化。针对阵列单元为 128×128 的面阵探测器, 利用所提方法对材质不同、距离不同的两种实验场景的激光回波的空间网格划分数进行了优化。当探测器单像元细分数为 3×3 , 空间网格总划分数为 $384 \times 384 \times L$ (L 为距离精度决定的细分数) 时, 采纳度达到最大值。每帧场景的平均生成耗时均小于 8 ms, 实现了帧频为 125 Hz 的高帧频、高逼真度的动态场景生成。理论及实验结果均表明, 在计算资源有限的情况下, 所提方法可实现生成回波场景相似度和计算资源消耗间的平衡, 是一种实用的三维激光回波场景生成优化方法。

关键词 遥感; 激光雷达回波场景生成; 相似度评估; 层次分析法; 空间划分

中图分类号 TP391.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2028001

Lidar Echo Scene Generation Optimization Based on Similarity Evaluation

Wang Jiaojiao^{1,2}, Wang Xin^{1,2*}, Gao Yanze^{1,2}, Li Zhuo^{1,2}, Yang Suhui^{1,2}, Zhang Jinying^{1,2}¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, Beijing 100081, China

Abstract Lidar echo scene generation, based on three-dimensional scene construction and laser scattering principle, can be used to simulate the laser echo characteristics of real scenes and is an important means for testing the performance of laser array detector. To efficiently generate dynamic scene with high simulation accuracy, an adoption degree composed of the simulation similarity of laser echo scene and scene calculation time is constructed and used as the evaluation function. The spatial mesh number of laser echo scenes is thereby optimized. For an area array detector with 128×128 elements, the proposed method is used to optimize the number of spatial meshes of laser echos in two experimental scenes with different materials and distances. When subdivision number of the detector single pixel is 3×3 and the total number of spatial meshes is $384 \times 384 \times L$ (L is subdivision number determined by distance accuracy), the adoption degree reaches the maximum values. The average generation time of each frame scene is less than 8 ms, and the dynamic scene generation with high frame rate (125 Hz) and high fidelity is realized. The theoretical and experimental results show that this method can balance the similarity of the generated echo scene and computing resource consumption when the computing resources are limited, and it is a practical optimization method for three-dimensional laser echo scene generation.

Key words remote sensing; lidar echo scene generation; similarity evaluation; analytic hierarchy process; space division

OCIS codes 280.3640; 110.1758

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61875011, 61835001)

通信作者: *wangxin@bit.edu.cn

1 引言

激光成像雷达^[1]可通过光在介质中的传输和在介质表面的反射来获取被测物的位置信息、速度信息、几何及表面特征信息,对这些信息进行处理后可重构出带有光学特征的三维动态场景。与传统的二维成像相比,其包含更多的目标信息。近年来,全波激光成像雷达在精确制导、行星表面着陆、无人驾驶等军事、航空航天和工业领域中的应用越来越广泛^[2-7]。

激光回波仿真实验^[8]基于激光雷达场景生成计算机和激光回波目标模拟器,可根据实验要求对典型场景的激光回波进行模拟,进而可以在实验室环境下全面考察激光雷达的探测性能。2012年, Kim等^[9]研制了具有8路光学回波信号通道的激光三维场景模拟器样机,距离分辨率可达0.075 m,距离模拟范围为15~2500 km。2016年,徐锐^[10]研制了激光三维场景模拟器样机,其光学回波信号通道达到了108路,但距离分辨率仅为1.04 m,距离模拟范围为0~15 km。2019年, Gao等^[11]在实验中实现了像元数为 32×32 的激光回波场景生成,距离分辨率为0.3 m。随着激光阵列探测器的发展,激光成像雷达的探测像元数已提升至 128×128 ^[12]。Schultz等^[13]研制的近红外激光阵列探测器的像元数达到了 640×480 。由于目前激光回波场景生成技术在帧频和通道数上均难以满足激光成像雷达的仿真需求,因此研究耗时短且仿真逼真度高的激光回波场景生成技术具有重要意义。

激光回波仿真实验需要利用计算机进行理论计算以得到激光回波信号。计算机激光回波生成技术基于三维场景构建和激光散射原理,其所生成的激光回波信号的逼真度、帧频和距离精度对激光回波仿真实验的结果起决定性作用,是激光回波仿真系统的关键技术。为了在保证仿真逼真度的前提下提高场景生成的帧频,需要对场景的空间划分及延时划分进行优化。

本文提出了一种将采纳度作为评价函数的空间网格划分优化方法。用于优化的评价函数(采纳度)既包含描述回波场景逼真度的相似度项又含有评估场景生成耗时的时间项,进而可以兼顾激光回波场景生成对仿真逼真度和帧频的要求。此外,利用层次分析法研究了回波脉冲延时、脉冲宽度和强度以及场景生成耗时对采纳度的贡献,并对各参量矩阵的权重进行了分配。最后,利用所提的激光回波场景生成优化方法,对材质不同、距离不同的

场景的激光回波信号进行了计算,确定了最优的空间网格划分方式。

2 激光回波场景生成优化方法

为了真实模拟目标的激光回波特性,要求激光回波模拟系统能够生成全波激光回波。对于运动目标,还要求模拟系统具有较高的帧频。对于基于脉冲激光探测的主动激光雷达,激光接收单元接收到的回波是经过目标表面上一小面元散射并返回的激光脉冲,该激光脉冲具有延时、展宽和衰减的特点。在进行激光回波信号计算时,空间划分的网格数越多,追迹的光线数越多,回波信号与真实场景回波信号的相似性就越高。但是,计算一帧激光回波所需的网格数和光线数越多,计算耗时也就越多,这将难以满足帧频要求。为了合理选择空间网格划分数,本节将对激光回波信号进行相似度计算,并结合场景生成耗时构建评价函数(采纳度),进而得到最合理的空间网格划分方法。

2.1 激光回波场景参量矩阵生成方法

为了描述激光回波信号产生的物理过程,采用了基于开源三维渲染引擎(OSG)的碰撞检测算法^[14],并借助开放式图形库(OpenGL)将计算工作放在图形处理器(GPU)中进行。在计算中假设激光雷达发射的激光脉冲为高斯脉冲,并且用双向散射函数来描述目标的激光反射特性。计算光线从激光光源出发,然后被目标反射并返回到探测端所需的时间可得到距离信息,如图1所示,其中 t_{r-1} 为光线到达 L_{r-1} 距离处目标平面的时间, t_r 为光线到达 L_r 距离处目标平面的时间, t_{r+1} 为光线到达距离 L_{r+1} 处目标平面的时间, t_{\max} 为光线到达最远探测距离 L_{\max} 处目标平面的时间。利用探测端收集到的脉冲能量及脉冲形状可描述被照射的目标表面的几何形状和材质信息。

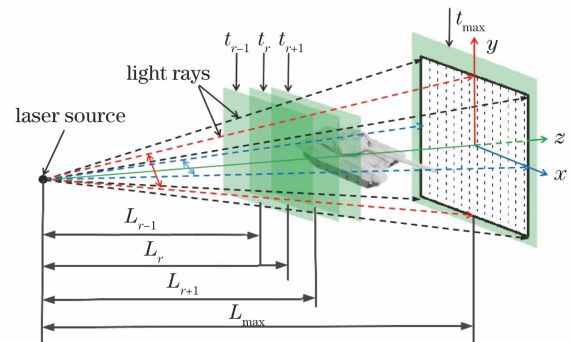


图1 场景生成空间划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scene generation space division

为准确计算探测器单像元对应视场所覆盖的场景回波信号,将单个像元在空间上细分为 $m \times m$ 个子像元,如图 2 所示,其中 $R_1 \sim R_9$ 分别为每个子像元所覆盖的视场。通过计算子像元的回波信号并将 $m \times m$ 个子像元回波信号进行叠加,可实现单像元全波信号的计算。

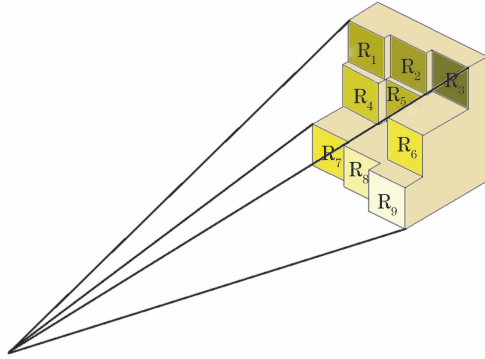


图 2 单像元视场划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of field-of-view division of single pixel

假设发射信号在时域上为高斯分布的激光脉冲,且每个子像元覆盖区域的激光回波仍用高斯函数表示,则回波脉冲^[15]为

$$P_n(t) = \frac{\rho_n}{m^2} \cdot \frac{1}{\sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(t - t_n)^2}{2\sigma_w^2} \right], \quad n = 1, 2, \dots, m^2, \quad (1)$$

$$t_n = t_0 + \frac{2n_g R_n}{c}, \quad (2)$$

$$\sigma_w = \frac{\tau_t}{2\sqrt{2\ln 2}}, \quad (3)$$

式中: ρ_n, R_n 分别为第 n 个子像元覆盖区域内目标的平均反射率和平均距离; t_n 为第 n 个子像元回波峰值对应的时刻; t_0 为发射激光脉冲峰值对应的时刻; n_g 为大气的群折射率; c 为真空中的光速; τ_t 为发射激光脉冲的半峰全宽。探测器单像元接收到的回波为 $m \times m$ 个子回波的叠加^[15]:

$$P_r(t) = \sum_{n=1}^{m \times m} P_n(t). \quad (4)$$

当已知子像元所覆盖区域内目标的平均反射率 ρ_n 和平均距离 R_n 时,根据(1)~(4)式可计算得到激光回波脉冲。为了对单个探测像元接收到的激光回波脉冲进行描述,选取脉冲延时、脉冲强度和脉冲宽度构成激光回波信号特征量。当所生成的激光回波场景为 $N \times N$ 的阵列时,回波信号可用 $N \times N$ 的延时矩阵、强度矩阵和脉宽矩阵来表示。

由于目标或背景具有一定的面型,因此单个探

测像元接收到的回波信号不再是规则的高斯形状,为得到回波脉冲的延时,选取基于波形质心的鉴别方法^[16]:

$$\begin{cases} t_c = \frac{\sum_{i=1}^u i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^u y_i}, \\ y_c = \frac{\sum_{i=1}^u y_i}{u} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: t_c 为波形质心的横坐标(时间轴); y_c 为波形质心的纵坐标(幅度轴); y_i 是波形中大于阈值幅值的第 i 个采样点的纵坐标; u 为采样点总个数。由此可得回波信号的延时^[15]为

$$t_d = t_c - t_0. \quad (6)$$

图 3 为单像元回波信号的计算示意图。

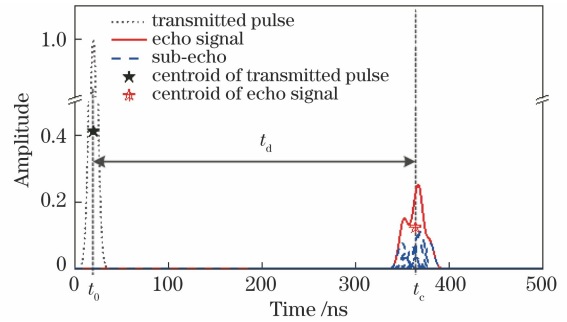


图 3 单像元回波信号的计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single pixel echo signal calculation

在只考虑目标几何形状的影响下,单像元回波信号的脉冲展宽 τ_{geo} ^[15]可表示为

$$\tau_{\text{geo}} = \tau_{\text{rge}} - \tau_t, \quad (7)$$

式中: $\tau_{\text{rge}} = \max(t_n) - \min(t_n)$ 。

当激光脉冲在大气中传输,经过云、雾等散射介质时,也会产生时域展宽,单像元视场内由大气传输造成的回波信号的脉冲展宽 τ_{sca} ^[17]为

$$\tau_{\text{sca}} = \frac{Z}{c} \left\{ \frac{0.3}{\omega_o Z_o \gamma_o^2} \left[\left(1 + \frac{9}{4} \omega_o Z_o \gamma_o^2 \right)^{3/2} - 1 \right] - 1 \right\}, \quad (8)$$

$$\omega_o = \chi / \mu, \quad (9)$$

$$Z_o = Z / \mu, \quad (10)$$

式中: Z 为介质的物理厚度,单位为 m; ω_o 为单次散射比; Z_o 为介质的光学厚度,单位为 m; γ_o 为粒子散射角的均方根值,单位为 rad; χ 为介质的散射系数; μ 为介质的消光系数。综合考虑由目标几何形状和大气传输造成的脉冲展宽,可得回波信号的脉冲展宽 τ 为

$$\tau = \tau_{\text{geo}} + \tau_{\text{sea}} \quad (11)$$

为了计算激光回波信号的幅值,采用 Cook-Torrance BRDF 模型来描述目标表面的激光散射特性,记为 f_r 。若发射激光脉冲功率为 P_t ,双程大气透过率为 η_{atm}^2 ,入射光被距离 R_L 处的目标反射后,接收面积为 A_r 、入射光线天顶角为 θ_i 、透过率为 η_{sys} 的探测系统接收到的回波信号峰值功率(P_r ,即回波信号峰值功率)^[15]为

$$P_r = \frac{P_t \cdot f_r \cdot A_r^2 \cdot \cos \theta_i}{4\pi \cdot R_L^4} \cdot \eta_{\text{sys}} \cdot \eta_{\text{atm}}^2 \quad (12)$$

2.2 激光回波相似度评价方法

计算生成的激光回波应包含场景的距离信息(脉冲延时)、材质信息(脉冲强度)以及几何细节信息(脉冲形状)。因此,为评价所生成激光回波场景的逼真度,所建立的评价函数须包含上述三者的信息。当所生成的激光回波场景为 $N \times N$ 的阵列时,三者分别由 $N \times N$ 的延时矩阵、强度矩阵和脉宽矩阵来描述。为了评价这三个参量的逼真度,生成了具有高空间网络划分数的激光回波脉冲特征矩阵以代表真实场景的激光回波。由此可见,采用矩阵相似性计算法,通过计算低空间划分数下激光回波脉冲特征矩阵与真实场景激光回波脉冲特征矩阵的相似性,可实现对较低空间网格划分条件下生成激光回波逼真度的评价。

2.2.1 矩阵相似性计算

矩阵相似性计算^[18]用于计算矩阵相同位置处的元素的一致性,其数值范围为 $0 \sim 1$,越接近 1,表示矩阵的相似程度越高,反之,矩阵之间的差异越大。

若将阵列数为 $u \times v$ 的两矩阵分别记作 C_1 和 C_2 ,则将矩阵内积^[18]定义为

$$\langle C_1, C_2 \rangle = \text{tr}(C_2^T C_1), \quad (13)$$

式中: $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的主对角线元素之和。矩阵 A 的范数的表达式^[18]为

$$\|A\| = \langle A, A \rangle^{1/2} \quad (14)$$

定义两矩阵之间的相似度^[18]为

$$S = \frac{\langle C_1, C_2 \rangle}{\|C_1\| \cdot \|C_2\|} \quad (15)$$

利用(15)式可计算得到激光回波的强度、脉宽和延时矩阵的相似度,并记作 S_1, S_2, S_3 。

2.2.2 激光回波场景的综合相似度

将强度矩阵相似度 S_1 、脉宽矩阵相似度 S_2 和延时矩阵相似度 S_3 以一定的权值相加来表示激光回波场景的综合相似度,其表达式为

$$S_{\text{SIM}} = \omega_1 S_1 + \omega_2 S_2 + \omega_3 S_3, \quad (16)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别为不同相似度对应的权值,且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。 S_{SIM} 越大表明所生成的激光回波场景的逼真度越高。

2.3 单像元空间细分数的优化方法

在计算回波信号时,若假设延时精度为 1 ns,则对应的距离分辨率为 0.15 m。总的计算量会随着空间网格划分数(所计算的子回波信号数量)的增加而增加,当子像元的细分数为 $m \times m (m=2, 3, \dots)$,探测器的阵列规模为 $N \times N$, z 方向距离决定的细分数为 l 时,总的空间网格划分数为 $(m \times N) \times (m \times N) \times L$ 。若探测范围为 $0 \sim L_{\text{max}}$,则 L 的表达式为

$$L = \frac{L_{\text{max}}}{0.15} \quad (17)$$

构建了两个典型场景来探究不同网格划分数与激光回波场景生成时间以及场景相似度的关系。图 4 为两个典型场景的回波场景计算时间与空间网格划分数的关系曲线,可以看出,像元空间细分数越大,两个场景的变化规律越相似,其生成耗时均以二次函数的趋势上升。

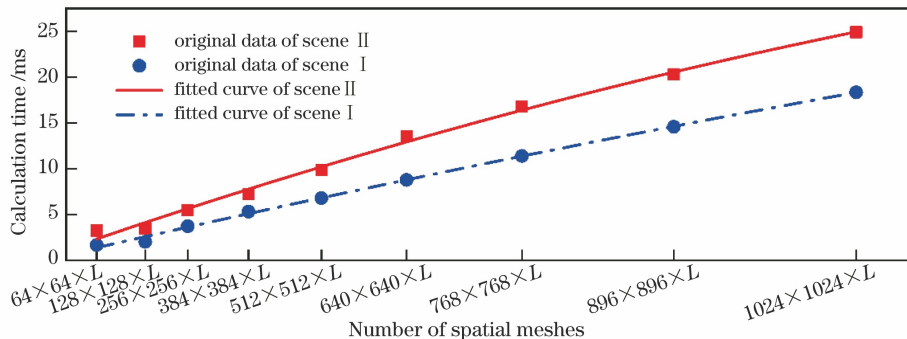


图 4 场景计算时间与空间网格划分数的关系

Fig. 4 Relationship between calculation time of scene and number of spatial meshes

当采用(16)式对激光回波综合相似度进行计算时,得到的综合相似度与网格划分的关系如图 5 所

示。可以发现,随着网格划分的细化,激光回波场景的逼真度逐步提高,在网格划分数达到 $384 \times 384 \times L$

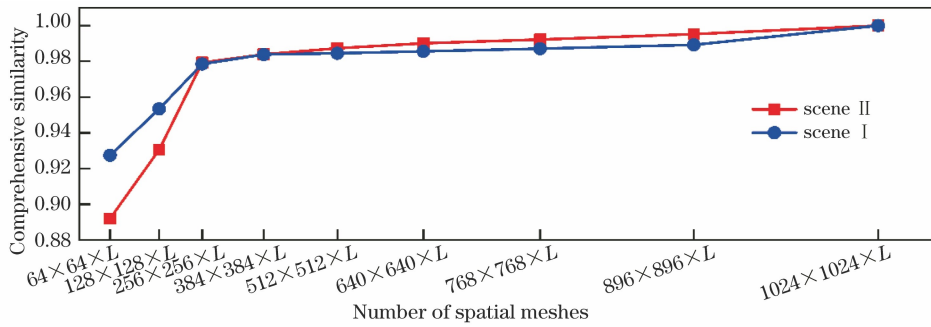


图 5 场景综合相似度与空间网格划分数的关系

Fig. 5 Relationship between comprehensive similarity of scene and number of spatial meshes

时,综合相似度超过了 0.98。虽然精细的网格划分提高了场景的相似度,但是也增加了场景生成耗时 T 。通过较大计算量来获得场景逼真度较小的提升是不明智的,故有必要对空间网格划分数进行优化。通过确定合适的空间网格划分数,提高回波场景的生成效率,进而实现高帧频的逼真激光回波场景生成。

构建了由激光回波场景综合相似度以及回波场景生成耗时组成的采纳度,对空间网格划分数进行优化。通过对综合相似度和时间常数赋予不同的权值,体现各个部分的重要性。采纳度 P 的表达式为

$$P = L_1 S_{SIM} + L_2 T = L_1 \cdot (\omega_1 S_1 + \omega_2 S_2 + \omega_3 S_3) + L_2 T, \quad (18)$$

式中: L_1, L_2 为参量权重,且满足 $L_1 \cdot (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) + L_2 = 1$ 。

回波场景生成耗时变化较大,其绝对数值与综合相似度的差异也很大,为了进行权重计算,首先对场景生成实际耗时 t 作归一化处理:

$$T' = \frac{t - t_{min}}{t_{max} - t_{min}}, \quad (19)$$

式中: $t_{min} = 0.1$ ms 为场景生成规定的最短耗时; $t_{max} = 100$ ms 为场景生成规定的最长耗时; T' 单调递增且 $T' \in [0, 1]$ 。高采纳度不仅要求综合相似度高,还要求场景生成耗时短。因此,在相似度一定的情况下,采纳度与场景生成耗时成反比,则场景生成耗时 T 为

$$T = 1 - T'. \quad (20)$$

层次分析法^[19]是一种定性和定量分析相结合的方法,可用于解决多准则决策问题,故利用层次分析法来计算采纳度中四个指标的权重。权重确定流程图如图 6 所示。

在构造判断矩阵时,根据各指标重要性的不同,将数字 1, 2, ..., 9 及其倒数作为标度来定义判断矩阵 $D = (d_{x_1 y_1})_{z_1 \times z_1}$, 其中 $d_{x_1 y_1}$ 为矩阵 D 中 (x_1, y_1) 位置的元素, $d_{x_1 y_1}$ 的选取规则如表 1^[19] 所示。

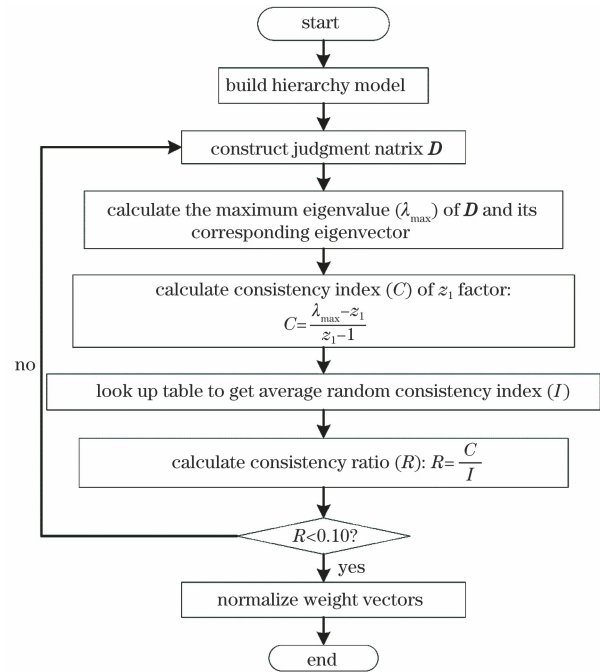


图 6 权重确定流程图

Fig. 6 Flow chart of weight determination

表 1 判断矩阵标度定义

Table 1 Definitions of judgment matrix scales

Scale	Meaning
1	The former factor is as important as the latter factor
3	The former factor is slightly more important than the latter factor
5	The former factor is significantly more important than the latter factor
7	The former factor is strongly more important than the latter factor
9	The former factor is extremely more important than the latter factor
2, 4, 6, 8	The median value of the above adjacent judgments
Reciprocal	If the importance ratio of factor x_1 to factor y_1 is $d_{x_1 y_1}$, the importance ratio ($d_{y_1 x_1}$) of factor y_1 to factor x_1 is $1/d_{x_1 y_1}$

表 2 为平均随机一致性指标(I)^[20]。可根据指标个数 z_1 , 在表 2 中查取平均随机一致性指标。

表 2 平均随机一致性指标

Table 2 Average random consistency index

z_1	1	2	3	4	5	6	7	8
I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41

通过一致性检验后,最大特征值对应的特征向量即为权重向量,将其归一化即可得到各个指标的权重。通过层次分析法得到合适的权重后即可确定采纳度的计算公式。采纳度越大,说明激光回波的综合相似度越高,同时回波场景生成的耗时越少,越符合高逼真度动态场景生成的要求。

3 激光回波场景生成优化实验

在激光回波场景生成优化实验中,首先,利用计算机进行目标场景的预生成,计算单像素细分数为 8×8 时的回波场景,并将其作为高精度对比场景。然后,进行回波场景生成优化,通过计算不同网格划分数下各个参量矩阵的相似度及回波场景生成耗时构成的采纳度,确定采纳度最高时对应的划分数(m)。最后,根据 m 逐帧生成场景进行动态仿真,进而实现具有高帧频、高逼真度的激光回波场景,具

体流程如图 7 所示。

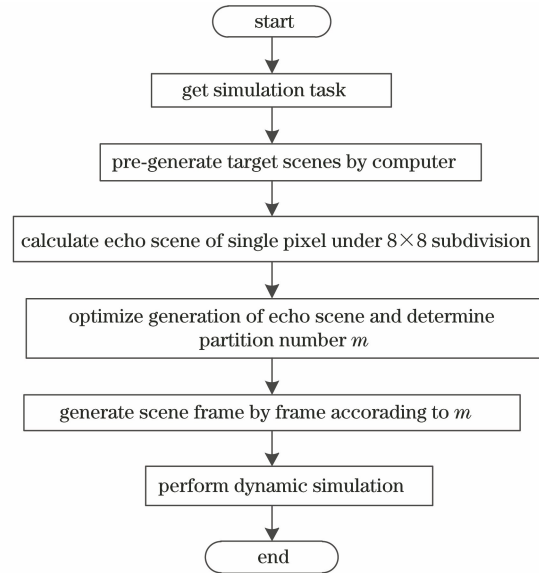


图 7 激光回波场景优化流程

Fig. 7 Optimization process of laser echo scene

在场景生成优化实验中,采用两个简单场景:场景 I 中包含三种材质的物体,背景为粗糙砖墙,在混凝土平台上放置一个带有铁锈的金属球,球体半径为 3.0 m;场景 II 中包含花瓶、泥土与绿植。将高斯激光作为光源渲染出的实验场景如图 8 所示。



图 8 场景生成优化实验场景。(a)场景 I;(b)场景 II

Fig. 8 Scenes of scene generation optimization experiment. (a) Scene I; (b) scene II

对于场景 I,假设探测器阵列数为 128×128 ,视场角为 1° ,该场景与探测器的最远距离为 1 km,距离分辨率为 0.15 m。细分数从 $1/2$ 变化到 8 时,对应场景的空间网格划分数从 $64 \times 64 \times 6667$ 变化到 $1024 \times 1024 \times 6667$ 。对于场景 II,假设探测器阵列数为 128×128 ,视场角为 45° ,该场景与探测器的最远距离为 100 m,距离分辨率为 0.15 m。细分数从 $1/2$ 变化到 8 时,对应场景的空间网格划分数从 $64 \times 64 \times 667$ 变化到 $1024 \times 1024 \times 667$ 。对场景进

行细分后,根据(1)~(12)式可计算得到场景的激光回波矩阵。基于层次分析法计算所得的各要素的权重指标如表 3 所示。

空间网格划分程度越高,其场景的综合相似度越高,故将空间网格划分数为 $1024 \times 1024 \times L$ 时得到的激光回波场景作为高精度对比场景。由(13)~(20)式及表 3 中的指标权重,可计算得到综合相似度、场景生成耗时及采纳度,两种场景的计算结果如表 4 与表 5 所示。

表 3 权重指标

Table 3 Weight indicators

Indicator	Weighting coefficient	Normalized weighting coefficient	λ_{\max}	C	R
Strength similarity S_1	0.6578	0.351			
Pulse width similarity S_2	0.6578	0.351			
Delay similarity S_3	0.1258	0.109	4.0042	0.0014	0.0016
Scene generation time T	0.3446	0.189			

表 4 场景 I 的采纳度计算结果

Table 4 Calculation results of adoption degrees for scene I

Degree of segmentation	Strength similarity S_1	Pulse width similarity S_2	Delay similarity S_3	Comprehensive similarity S_{SIM}	Actual rendering time t /ms	Scene generation time T	Adoption degree P
64×64	0.8170	0.9333	0.999641	0.8920	1.6725	0.9843	0.90931
128×128	0.8832	0.9560	0.999842	0.9305	2.0257	0.9807	0.93989
256×256	0.9760	0.9762	0.999998	0.9793	3.7361	0.9636	0.97632
384×384	0.9839	0.9788	0.999999	0.9839	5.3145	0.9478	0.97704
512×512	0.9888	0.9818	0.999999	0.9873	6.8041	0.9329	0.97698
640×640	0.9925	0.9845	0.999999	0.9901	8.7772	0.9131	0.97553
768×768	0.9946	0.9873	0.999999	0.9922	11.3947	0.8869	0.97227
896×896	0.9972	0.9918	0.999999	0.9952	14.5757	0.8551	0.96847
1024×1024	1.0000	1.0000	1.000000	1.0000	18.3420	0.8174	0.96549

表 5 场景 II 的采纳度计算结果

Table 5 Calculation results of adoption degrees for scene II

Degree of segmentation	Strength similarity S_1	Pulse width similarity S_2	Delay similarity S_3	Comprehensive similarity S_{SIM}	Actual rendering time t /ms	Scene generation time T	Adoption degree P
64×64	0.9091	0.9235	0.99779	0.9274	3.245	0.9685	0.93505
128×128	0.9501	0.9426	0.99818	0.9534	3.488	0.9661	0.95573
256×256	0.9853	0.9653	0.99871	0.9785	5.480	0.9461	0.97234
384×384	0.9917	0.9709	0.99975	0.9838	7.244	0.9285	0.97333
512×512	0.9929	0.9714	0.99976	0.9845	9.879	0.9021	0.96894
640×640	0.9947	0.9720	0.99975	0.9856	13.568	0.8652	0.96280
768×768	0.9969	0.9733	0.99985	0.9871	16.792	0.8329	0.95794
896×896	0.9988	0.9781	0.99995	0.9892	20.312	0.7977	0.95365
1024×1024	1.0000	1.0000	1.00000	1.0000	24.898	0.7518	0.95308

根据表 4 与表 5 的计算结果,可得到空间网格划分数与采纳度的关系曲线,如图 9 所示。当单像元网格划分数为 3×3 时,采纳度达到最大值,此时的方案为最优的激光场景回波生成方案。

在实验场景 I 的不同材质物体中选取三个单像元视场对应区域,分别计算低网格划分、高精度网格划分以及优化后的网格划分所对应的回波信号,如图 10 所示。在不同材质上,优化后的网格划分与高精度网格划分得到的回波信号很接近,相较于低网格划分情况,回波相似性有了明显的

提高。

在场景 I 中,三种网格划分方式下生成的激光回波信号如图 11 所示。图 11(a)、(d)、(g)为低网格划分下的回波信号,图 11(b)、(e)、(h)为最优网格划分下的回波信号,图 11(c)、(f)、(i)为高精度网格划分下的回波信号。通过对三组回波场景进行对比,可以发现,低网格划分下的回波信号与高精度网格划分下的回波信号差别较大。最优网格划分下的回波强度信息及脉宽信息与高精度网格划分下的回波强度信息及脉宽信息的相似度很好,二

者均可以明显识别出墙面砖体的纹路,铁锈纹路的相似度也极高。最优网格划分下的回波场景生成时

间由 18.3420 ms 降低至 5.3145 ms,帧频提高了 3 倍以上。

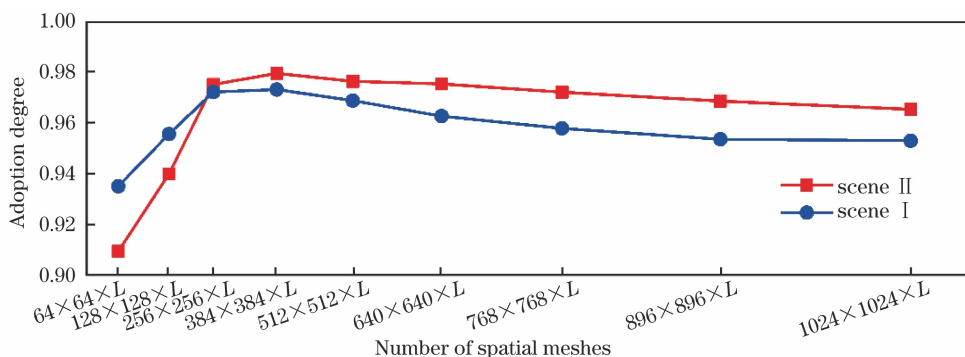


图 9 不同场景中不同网格划分数下的采纳率

Fig. 9 Adoption degrees for different meshes in different scenes

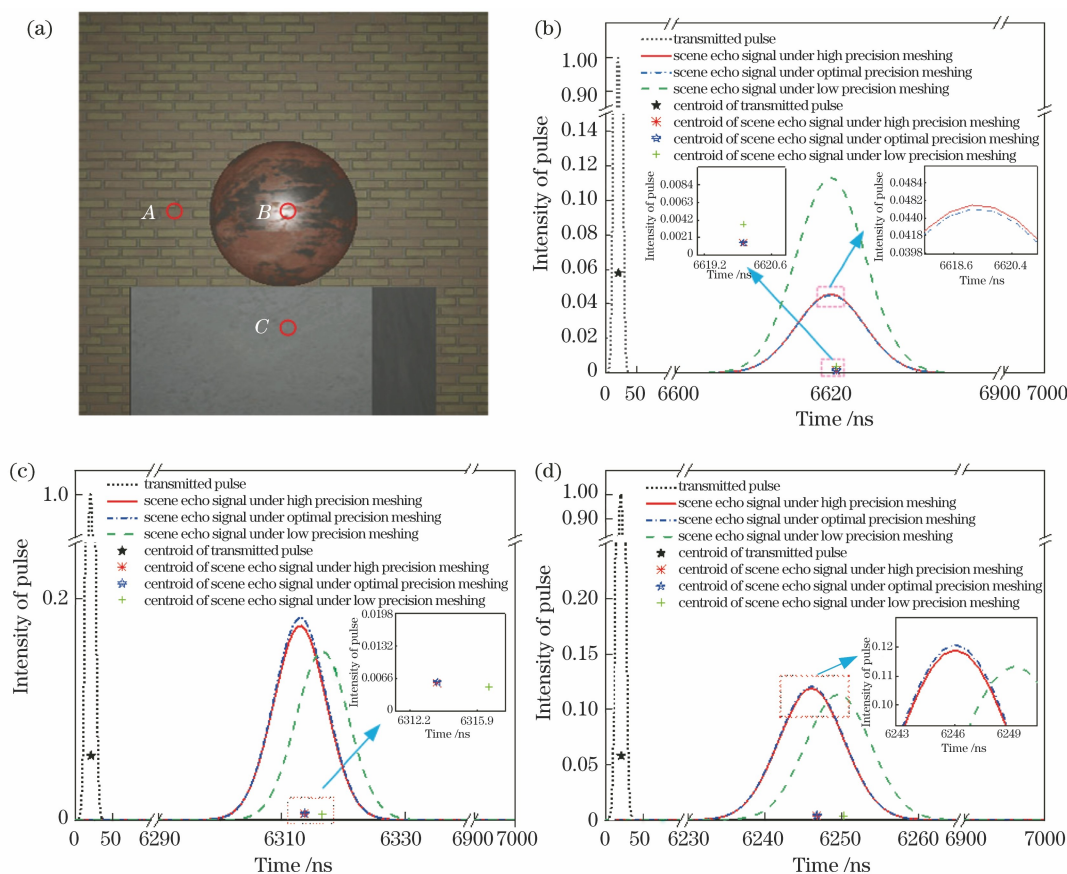


图 10 场景 I 中不同点处的回波信号。(a)三点在场景 I 中的位置;(b) A 点;(c) B 点;(d) C 点

Fig. 10 Echo signals at different points in scene I. (a) Positions of three points in scene I; (b) point A; (c) point B; (d) point C

在场景 II 中,叶片形状及位置较为复杂,因此具有较多的细节信息。低网格划分下生成的激光回波信号、采用优化空间网格划分数生成的激光回波信号与高精度网格划分下的回波信号(1024×1024×667)如图 12 所示。图 12(a)、(d)、(g)为低网格划分下的回波信号,图 12(b)、(e)、(h)为最优网格划分下的回波信号,图 12(c)、(f)、(i)为高精度网格划

分下的回波信号。可以看出,低网格划分下的回波信号与高精度网格划分下的回波信号相比,出现了位置的偏移与变形。而相较于低网格划分下的回波信号,最优网格化分下的回波信号细节明显增多,叶片形状更明显,层次也更丰富。最优网格划分下的回波场景生成时间由 24.898 ms 降低至 7.244 ms,同样使得帧频提高了 3 倍以上。

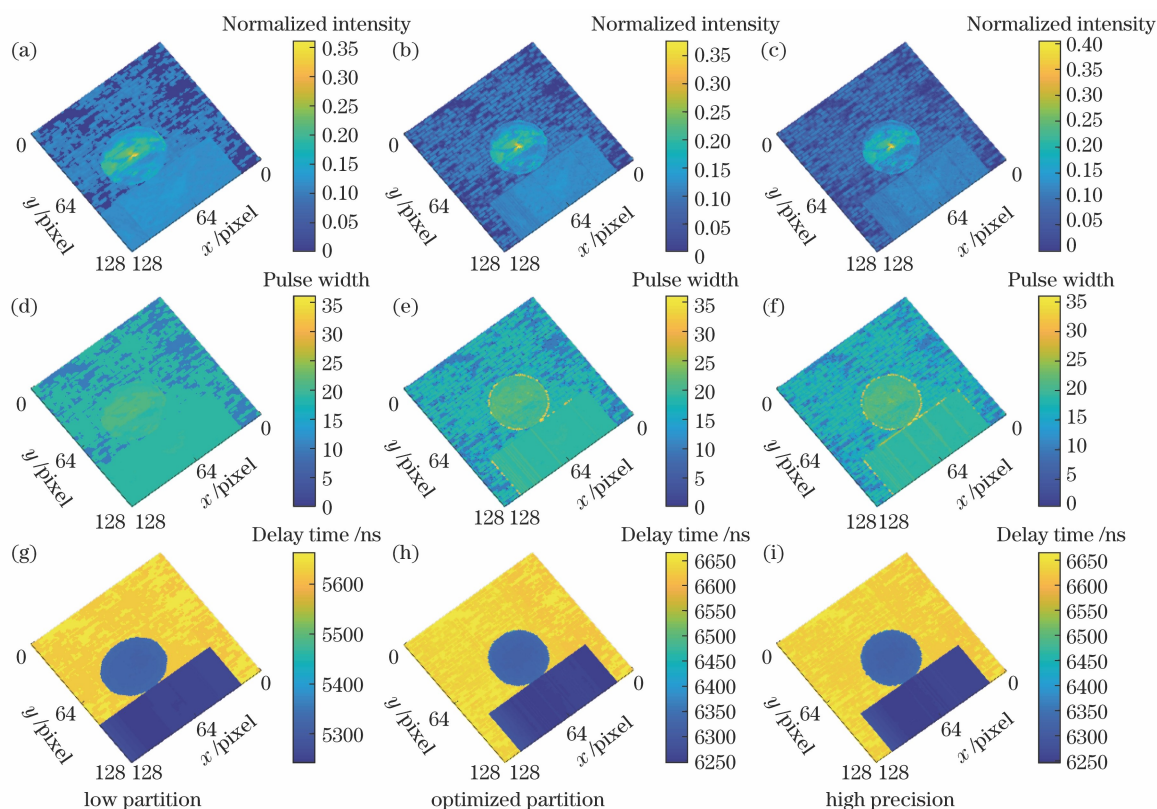


图 11 场景 I 的回波信号。(a)~(c)强度信息;(d)~(f)脉宽信息;(g)~(i)延时信息

Fig. 11 Echo signal in scene I. (a)-(c) Intensity information; (d)-(f) pulse width information; (g)-(i) delay information

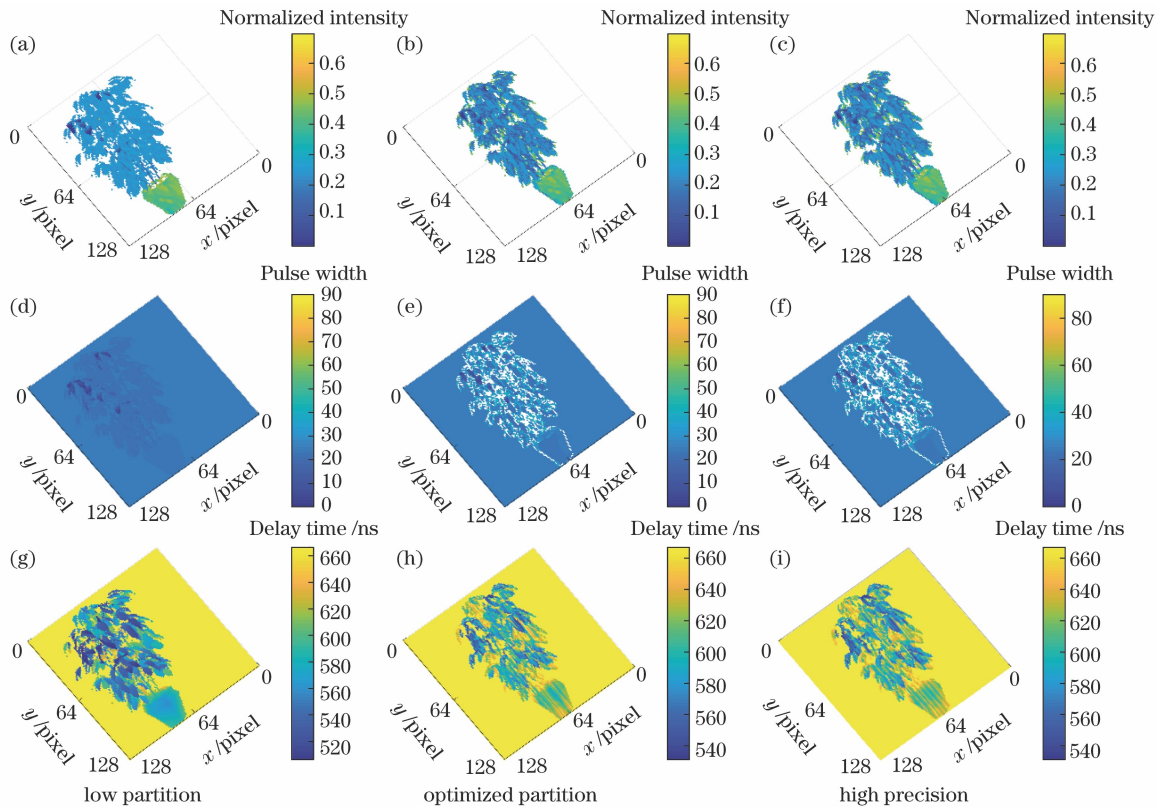


图 12 场景 II 的回波信号。(a)~(c)强度信息;(d)~(f)脉宽信息;(g)~(i)延时信息

Fig. 12 Echo signal in scene II. (a)-(c) Intensity information; (d)-(f) pulse width information; (g)-(i) delay information

对两个场景中的目标物体进行三维点云重构,通过延时时间计算点云的位置信息,再对回波信号进行积分可得到该位置的强度信息,重构出的点云数据如图 13 所示。图 13(a)~(c)分别为场景 I 中球体目标在低网格划分、最优网格划分、高精度网格划分下的点云数据,图 13(d)~(f)为场景 II 中

花盆及绿植在低网格划分、最优网格划分、高精度网格划分下的点云数据。可以看出,在低网格划分下,目标物体的点云图均发生了不同程度的变形,与实际场景的相似性较差。最优网格划分下的点云图较为规整,与实际场景的相似性较好,细节较为逼真。

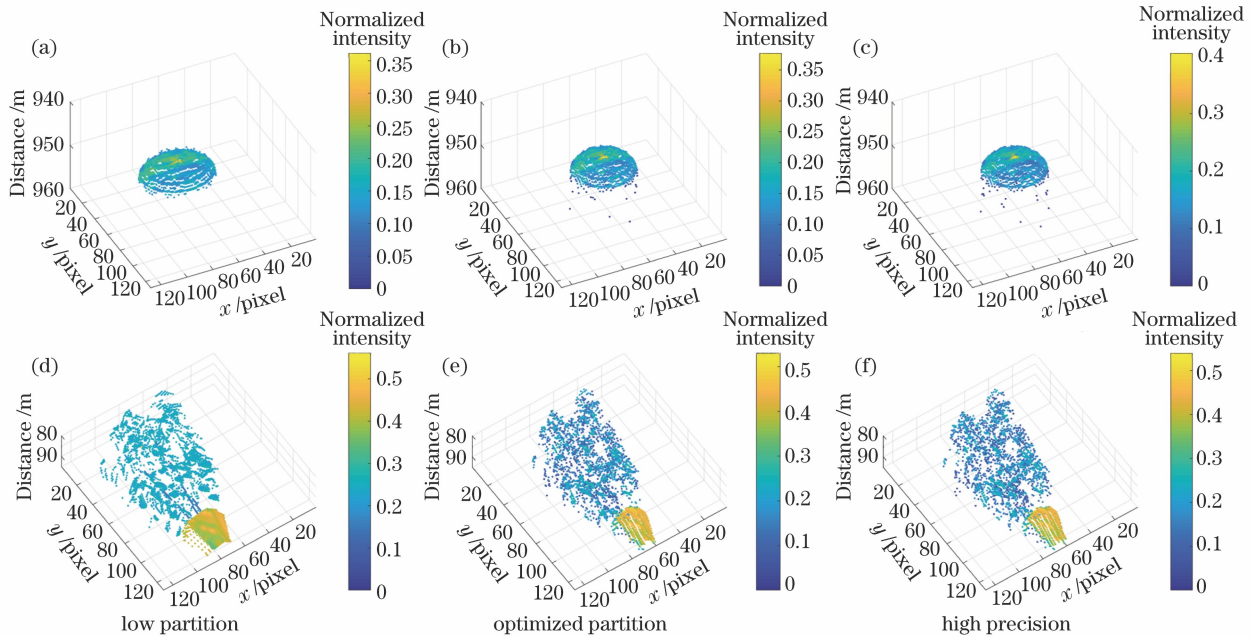


图 13 不同场景中的目标点云图。(a)~(c)场景 I ;(d)~(f)场景 II

Fig. 13 Target point cloud images in different scenes. (a)-(c) Scene I; (d)-(f) scene II

4 结 论

随着雪崩光电二极管 (APD) 阵列探测器的快速发展以及探测帧频的提高,在对大面阵 APD 阵列激光成像雷达进行测试时,不仅要求仿真生成的激光回波场景具有较高的逼真度,还要求激光场景生成的实时性较好。提出了一种用于激光回波计算的空间网格划分优化方法,将由三个回波脉冲特征参量矩阵的相似度和场景生成耗时组成的采纳度作为评价指标。通过计算回波场景强度矩阵、脉宽矩阵、延时矩阵的相似度,实现了对回波场景的逼真度评价。通过计算场景生成时间实现了对实时性的评价。在此基础上,采用层次分析法对各指标权重进行了分配,实现了对采纳度的计算。以采纳度作为评价函数,通过计算其最大值确定了空间网格的最优划分数。将所提方法用于墙面、混凝土平台与金属球相结合的场景 I (场景与探测器距离为 1 km) 与细节较丰富的绿植场景 II (场景与探测器距离为 100 m) 的激光回波生成,优化得到的场景空间网格的划分数分别为 $384 \times 384 \times 6667$ 与 $384 \times 384 \times 667$,

所构建场景的仿真相似度分别为 0.9839、0.9838,采纳度分别为 0.97704、0.97333,此时的强度矩阵、脉宽矩阵、延时矩阵和场景生成时间的权重分别为 0.351、0.351、0.109、0.189。每帧场景生成的平均耗时均小于 8 ms,所提方法可实现帧频为 125 Hz 的高逼真度动态场景生成。理论及回波场景生成实验均表明,利用所提空间网格划分优化方法,可实现高逼真度场景的高帧频生成。

参 考 文 献

- [1] Ni S X, Li Y F. Trend of laser radar for military[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(2): 111-114.
倪树新, 李一飞. 军用激光雷达的发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(2): 111-114.
- [2] Degnan J J. A conceptual design for a spaceborne 3D imaging lidar[J]. e&i Elektrotechnik Und Information stechnik, 2002, 119(4): 99-106.
- [3] Ivanov T, Huertas A, Carson J M. Probabilistic hazard detection for autonomous safe landing [C] // AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, August 19-22, 2013, Boston, MA. Virginia: AIAA,

- 2013.
- [4] Lü W, Wang S Y. High-band width data acquisition and storage system for three-dimensional imaging lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(10): 102801.
吕卫, 王粟瑶. 三维成像激光雷达高带宽数据采集与存储系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(10): 102801.
- [5] Peng Z X. The study of receiving experimental system of array imaging three dimensional lidar[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
彭章贤. 面阵三维成像激光雷达接收试验系统研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- [6] Liu D Q, Zhang J, Jin J C. Adaptive grid representation method for unmanned surface vehicle obstacle based on three-dimensional lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(1): 0110002.
刘德庆, 张杰, 金久才. 基于三维激光雷达的无人船障碍物自适应栅格表达方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(1): 0110002.
- [7] Zhang Y, Ren G Q, Cheng Z Y, et al. Application research of three-dimensional LiDAR in unmanned vehicle environment perception[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130001.
张银, 任国全, 程子阳, 等. 三维激光雷达在无人车环境感知中的应用研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130001.
- [8] Coker J S, Coker C F, Bergin T P. Ladar scene generation techniques for hardware-in-the-loop testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3697: 140-149.
- [9] Kim H J, Naumann C B, Cornell M C. Hardware-in-the-loop projector system for light detection and ranging sensor testing[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 083609.
- [10] Xu R. Key Technologies of LADAR scene projector[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
徐锐. 成像激光雷达回波目标模拟器关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [11] Gao Y Z, Zhou L, Wang X, et al. A programmable all-optical delay array for light detection and ranging scene generation[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 93489-93500.
- [12] Stettner R. Compact 3D flash lidar video cameras and applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7684: 768405.
- [13] Schultz K I, Kelly M W, Baker J J, et al. Digital-pixel focal plane array technology[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2014, 20(2): 36-51.
- [14] Gao Y Z, Wang X, Li Y Y, et al. Modeling method of a ladar scene projector based on physically based rendering technology[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8303.
- [15] Gao Y Z. 3D LADAR scene projector[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019.
高彦泽. 激光三维场景模拟技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- [16] Li Y X, Cui T X, Li Q Y, et al. Waveform centroid discrimination of return pulse weighting method in LIDAR system[J]. *Optik*, 2019, 180: 840-846.
- [17] Stotts L B. Closed form expression for optical pulse broadening in multiple-scattering media[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(4): 504-509.
- [18] Li Z W, He Z N, Guo T T, et al. Transient protection method for transmission lines based on similarity of time-frequency matrix[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 121-128.
李泽文, 贺子凝, 郭田田, 等. 基于时频矩阵相似度的输电线路暂态保护方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 121-128.
- [19] Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(7): 93-100.
邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(7): 93-100.
- [20] Chen J W, Zhang Y F, Zhang Y, et al. A comprehensive evaluation method based on analytic hierarchy process for CCD pixel subdivision algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0728002.
陈家伟, 张元飞, 张禹, 等. 基于层次分析法的 CCD 像素细分算法综合评价[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0728002.