

基于激光雷达强度值的目标反射特征提取

童祎**, 夏珉*, 杨克成, 李微, 郭文平

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 激光雷达强度值能在一定程度上反映目标反射特性,但由于受到距离、入射角、大气衰减效应等因素的影响,并不能直接作为目标分类的重要特征。针对常用车载扫描激光雷达,在对激光雷达强度值进行理论分析的基础上,通过实验的方式固定了其他因素对强度值的影响,建立了激光雷达强度值和表征目标反射特征参数间的关系模型。经过实验研究发现,半椭圆模型形式的角度因子能更好地描述目标漫反射强度值随入射角的变化规律,激光雷达强度值与接收功率间为线性转换规律;在盲区范围外,目标漫反射强度值随距离的变化遵循负指数规律。在实际应用中,可以结合雷达运动来获得同一目标在不同相对位置处的强度值,并将其代入模型中反演与目标反射特性相关的参数,以实现针对不同目标的区分。

关键词 遥感器; 激光雷达; 强度值; 反射特征; 目标分类

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102802

Target Reflection Feature Extraction Based on Lidar Intensity Value

Tong Yi**, Xia Min*, Yang Kecheng, Li Wei, Guo Wenping

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The lidar intensity value can reflect the target reflection characteristics to a certain degree, but it cannot be directly used as an important feature of target classification because of the influence of various factors, such as distance, incident angle, and atmospheric attenuation effect. For the lidar commonly used in vehicle, based on theoretical analysis of the lidar intensity value, the influence of other factors on the intensity values is fixed by the experimental method, and the relationship between the lidar intensity value and the parameters of the target reflection characteristics is established. The experimental results show that the angle factor of semi-elliptical model can better describe the variation of the target diffuse intensity value with the incident angle. And the lidar intensity value linearly transforms with the received power. Outside the blind area, the variation of target diffuse reflection value with distance follows the negative index law. In practical applications, we combine lidar motion to obtain intensity values of the same target at different relative positions. We can use the obtained intensity values to substitute into the model, invert the parameters related to the target reflection characteristics, and realize the differentiation of different targets.

Key words sensors; lidar; intensity value; characteristics of reflectivity; target classification

OCIS codes 280.3640; 280.1350; 010.0280; 120.5800

1 引言

扫描激光雷达具有不受环境光影响、测距精度高、扫描范围广等优点,被广泛应用于无人驾驶车辆以及移动机器人中探测障碍物、感知环境^[1]。无人驾驶和移动机器人系统中的一个重要任务就是对周

围环境中的目标物进行正确的分类和识别,从而针对不同类型目标作出相应决策^[2]。当前对于激光雷达数据的目标分类识别方法的研究主要利用的是点云坐标信息,通过点云坐标信息计算目标的几何尺寸,以实现目标的分类识别。Korchev等^[3]将点云数据分割为独立目标,通过提取每个目标的体积

收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2018-05-02; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(41406108, 41276042, 41006019)

* E-mail: xiamin@hust.edu.cn; ** E-mail: 350615598@qq.com

特征实现了对人、汽车、自行车和背景目标的分类。Kidono 等^[4]将三维点云按高度进行分层切片,提取每一层切片的长宽特征来实现对行人目标的检测。以上基于点云坐标数据提取目标几何特征的分类方法容易受到目标间相互遮挡的影响,并且无法区分两类几何尺寸特征接近的目标(如电线杆和树干,行人和指示牌)。

三维扫描激光雷达不仅可以准确地获取各个目标点的坐标信息,还可以记录每个目标点的反射强度值。强度数据能在一定程度上反映目标反射能力,在目标分类和识别中具有广阔的应用前景^[5-6]。但其不仅与目标反射能力有关,还受到距离、入射方位角和大气状况等因素的影响^[7]。研究如何从激光雷达强度值中提取表征目标特征参数对于加强强度数据的利用、拓宽目标分类方法具有重要意义。目前,国内外已有不少学者对目标强度值的校正利用进行了研究,以消除其他因素对强度值的影响,使得强度值能直接反映目标的反射特征。如 Höfle 等^[8]通过数值驱动和模型驱动两种方法分别对机载激光雷达强度数据进行校正,使实验区域整体强度更加均匀。程小龙等^[9]根据激光雷达测距方程,采用分段多项式模型对同一目标的激光雷达强度值进行距离和角度修正,使同一目标强度值趋于统一。李泉等^[10]提出了一种高斯混合模型的直方图匹配方法,用以获得的多站点云强度值进行纠正。以上研究主要是针对机载和地面扫描雷达,研究的目标主要是大立面的建筑物和地形等。而随着扫描激光雷达在无人车等领域中的广泛应用,如何从点云强度值中提取目标的反射特征来实现对目标的分类,具有重要的研究价值。本文依据激光雷达方程并考虑雷达的后续信号处理转换,在实验基础上,通过数据驱动的方式建立了激光雷达强度值与目标反射特征参数间的关系模型,并设计了简单验证实验,通过模拟雷达的直线运动获得同一目标在不同距离和入射角下的强度值,将其代入模型中实现了对目标反射特征参数的反演。

2 激光雷达强度值理论分析

激光雷达的强度值可以看作激光雷达将接收的目标回波光功率,经过光电信号转换和放大,以及后续的修正处理及数字化等一系列综合过程后返回给使用者的一个离散整数^[11]。激光雷达的回波强度主要通过激光雷达方程来进行表征,对于同轴扩展目标,激光雷达方程可以表示为^[12]

$$P_r = P_t \eta_t \eta_r \frac{D^2}{4} \cdot \frac{\exp(-2\alpha R)}{R^2} \cdot \rho \cos^2 \theta, \quad (1)$$

式中: P_r 为接收到的目标回波功率; P_t 为激光器发射功率; η_t 为发射光学系统的光学效率; η_r 为接收光学系统的光学效率; D 为接收探测器的孔径; α 为大气单程消光系数; R 为激光雷达中心到目标点的距离; ρ 为目标的反射率; θ 为目标点相对雷达的入射角度。

用函数 h 来表征雷达后续的信号处理过程,并称其为信号转换函数。将激光雷达强度返回值记为 I ,则有

$$I = h(P_r). \quad (2)$$

(1)式的推导是将目标看成余弦朗伯体。但真实目标往往会偏离朗伯体^[13],且扫描雷达对强度的校正过程中,其距离也不一定严格遵循平方反比变化规律^[14],故可将(1)式的激光雷达方程改写为

$$P_r = K \cdot g(\theta) \cdot f(R), \quad (3)$$

式中: K 为系统参数和目标反射系数的乘积,表征特定系统目标反射能力的大小; $g(\theta)$ 为角度因子,表征目标反射能量的空间分布情况; $f(R)$ 为距离因子,表征反射强度随距离的变化关系。

综合(2)式和(3)式,激光雷达强度返回值可以表示为

$$I = h[K \cdot f(R) \cdot g(\theta)]. \quad (4)$$

当通过实验确定了激光雷达的信号转换函数 h 、距离因子 $f(R)$ 以及角度因子 $g(\theta)$ 的具体形式后,便可建立起激光雷达强度值与目标反射特征参数间的关系,从而可以基于强度值提取目标反射特征,实现对目标的分类。

3 角度因子的实验研究

在(4)式所表征的激光雷达强度值理论模型中,角度因子 $g(\theta)$ 主要表征目标反射能量的空间分布,是与目标特征相关的参量。根据目标反射相关理论,一束激光入射到目标表面,发生的反射可以看作是镜面反射和漫反射的结合^[15]。同轴结构的激光雷达在非 0° 反射角下接收目标的漫反射能量。为了简单且较准确地描述目标漫反射光的空间分布,引入了半椭圆、椭圆两种模型的角度因子^[16],并与朗伯模型的角度因子进行对比。图1为3种角度因子模型的示意图,目标中心在 O 点,曲线上各点与点 O 连线的长度表示该方向上反射能量的相对大小。通过解析几何推导,可得出同轴情况下朗伯、半椭圆和椭圆3种模型的角度因子。

$$g_L(\theta) = \cos^2 \theta, \quad (5)$$

$$g_S(\theta) = \cos \theta \cdot \sqrt{\frac{1}{\kappa^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}}, \quad (6)$$

$$g_E(\theta) = \frac{\cos^2 \theta}{\kappa^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}, \quad (7)$$

式中： κ 为椭圆长短轴之比； $g_L(\theta)$ 、 $g_S(\theta)$ 和 $g_E(\theta)$

分别为朗伯、半椭圆和椭圆 3 种模型的角度因子。

搭建了一套同轴激光测量系统来比较几种不同角度因子对目标漫反射功率随角度变化关系的匹配程度。选择了城市环境中常见且具有代表性的材料如铝、聚四氟乙烯、水泥块和白聚晶瓷砖作为实验目标,设计的测量系统及测量目标如图 2 所示。

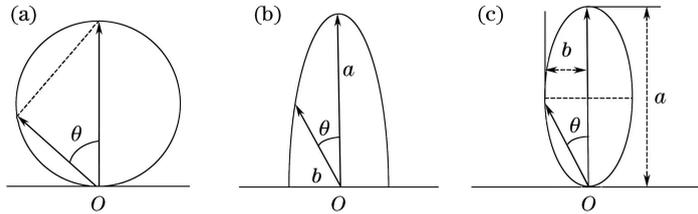


图 1 3 种角度因子模型的示意图。(a)朗伯模型；(b)半椭圆模型；(c)椭圆模型

Fig. 1 Schematic of three angle factor models. (a) Lambertian model; (b) semi-elliptical model; (c) elliptical model

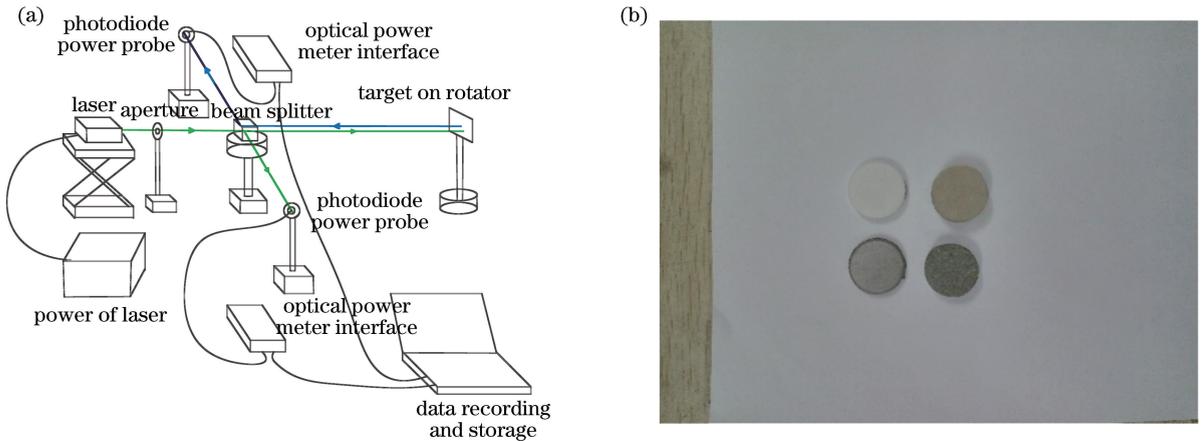


图 2 (a)实验系统设计图；(b)测量目标图

Fig. 2 (a) Design diagram of experimental system; (b) diagram of measured target

激光器发出的光经过立方分光晶体后分为两束,一束透射到达目标,一束反射进入光电探头用于光源稳定性监测。到达目标的激光束经过目标反射后在分光晶体处再次被分为两束光,一束反射进入另一端的光电探头用于记录反射光功率。实验过程中使用了分束镜,以保证激光雷达的收发同轴。实验所用的激光器为半导体激光器,可发射波长为 905 nm 的连续激光,功率在 0~160 mW 范围内可调。光电探头探测波长范围为 400~1100 nm,探测功率范围为 50 nW~50 mW。实验过程中,分别测量了入射角在 0~75°范围内每种目标的反射功率变化情况,每隔 5°测量一次数据;初始目标到接收探测器的距离为 150 mm,随后增大两者之间的距离,每隔 50 mm 测量了一组数据,直到目标反射功率很微弱。每次测量前利用平面反射镜确定 0°入射角的位置。

图 3 所示为测量距离为 150 mm 下几种目标的

漫反射光功率随角度的变化关系。分别用 3 种角度因子模型对接收功率进行了拟合,表 1 给出了几种角度因子模型拟合的相关系数。根据表 1 的数据,朗伯模型的角度因子对于 4 种目标漫反射能量的拟合相关系数均最低,且对于铝和瓷砖这 2 种镜面反射目标的漫反射能量的拟合系数远低于其他 2 种模型。半椭圆模型对聚四氟乙烯、水泥板和瓷砖 3 种目标漫反射能量的拟合系数均最高,对于铝的漫反射能量的拟合相关系数低于椭圆模型,但在数值上差距较小。

图 4 所示为不同距离下利用半椭圆模型拟合得到的目标漫反射强度值。表 2 中列出了 4 种目标在不同距离下半椭圆模型的角度因子中 κ 参数的值。从图 4 可以看出,半椭圆模型的角度因子能较准确地描述目标漫反射能量的空间分布情况。根据表 2 的数据,当用半椭圆模型的角度因子拟合目标漫反射强度值时,同一目标的 κ 值在不同距离下较为接

近,而不同目标的 κ 值则有所差别。半椭圆模型中的 κ 值表征了目标漫反射光强空间分布上的差异,

是目标反射特征的重要表征参数之一。

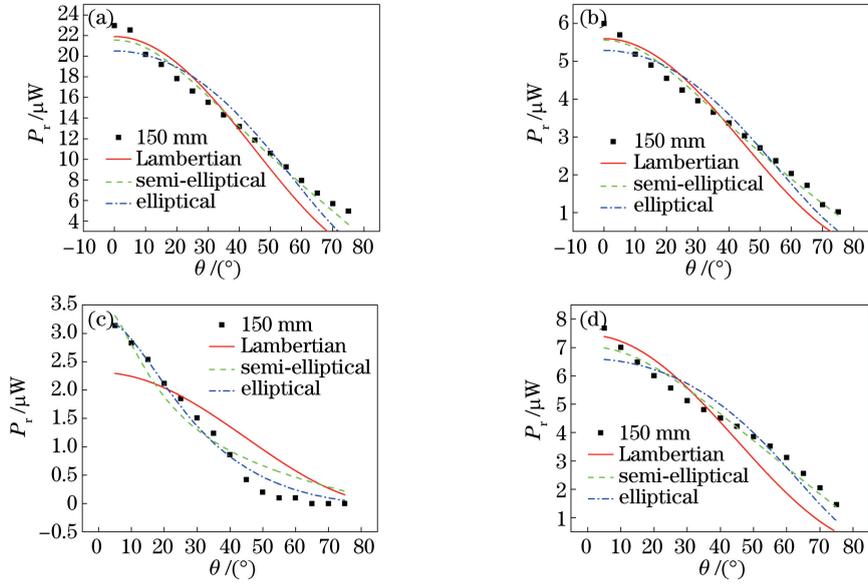


图 3 150 mm 处 4 种目标的光功率拟合曲线。(a)聚四氟乙烯;(b)水泥;(c)铝;(d)瓷砖

Fig. 3 Fitting curves of optical power for four targets at 150 mm. (a) PTFE; (b) cement; (c) aluminum; (d) glazed tile

表 1 4 种目标各角度因子模型的光功率拟合相关系数

Table 1 Correlation coefficients of optical power of different angle factor models for four targets

Model	PTFE	Cement	Aluminum	Glazed tile
Lambertian	0.90	0.92	0.80	0.81
Semi-elliptical	0.98	0.99	0.95	0.97
Elliptical	0.93	0.94	0.98	0.92

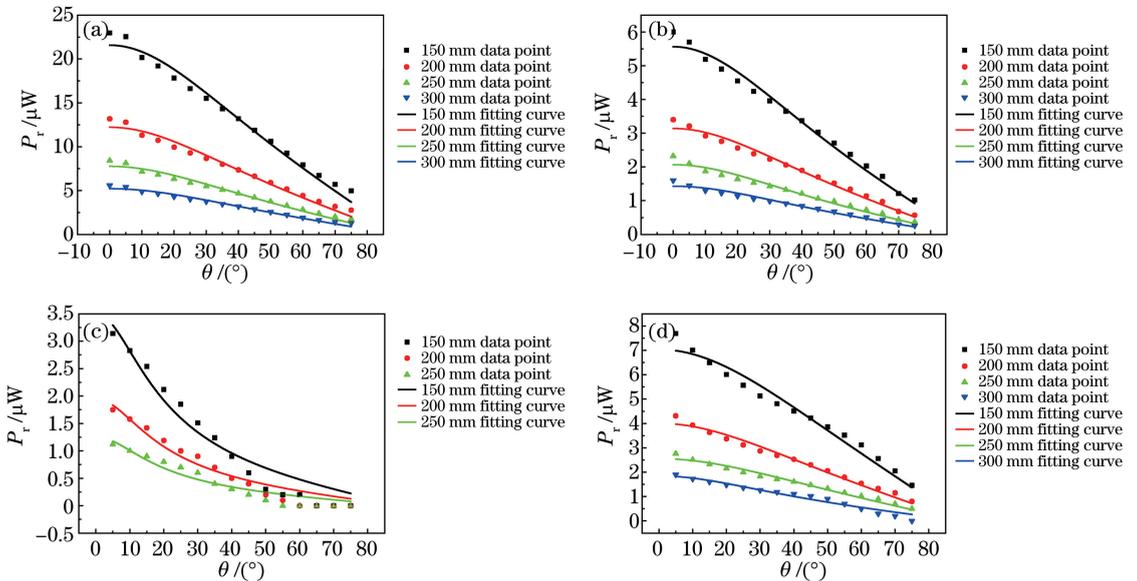


图 4 不同距离时 4 种目标反射强度及半椭圆拟合曲线。(a)聚四氟乙烯;(b)水泥;(c)铝;(d)瓷砖

Fig. 4 Reflection intensity and semi-elliptical fitting curves of four targets at difference distances.

(a) PTFE; (b) cement; (c) aluminum; (d) glazed tile

表 2 4 种目标不同距离下半椭圆模型拟合参数 κ 值

Table 2 Fitting parameters of semi-elliptical for four targets at different distances

Distance	PTFE	Cement	Aluminum	Glazed tile
150 mm	1.54	1.60	4.19	1.40
200 mm	1.55	1.60	4.13	1.47
250 mm	1.56	1.65	4.16	1.45
300 mm	1.53	1.64	—	1.46

4 信号转换函数和距离因子实验研究

在激光雷达强度值理论模型中,信号转换函数 h 及距离因子 $f(R)$ 是与激光雷达后续信号处理修正相关的参量,相应函数的具体形式与雷达本身相关。然而由于雷达厂商并不公开雷达后续的信号处理修正过程,因此需要利用数据驱动的方式建立相应函数的形式。

利用目前广泛应用于无人驾驶和移动机器人系统中的三维激光扫描雷达 VLP-16 进行实验,以研究信号转换函数以及距离因子的具体形式,并验证半椭圆模型角度因子的适用性。VLP-16 激光雷达强度值的量化等级为 8 bit,强度值范围为 0~255。采用控制变量的方式,分别获取不同入射方位角和距离下的目标点云强度值,通过最小二乘拟合的方

法确定相应函数的具体形式。在拟合信号转换函数的过程中,主要考虑了线性、对数、多项式等函数形式。分别选用了负指数、平方反比等模型来研究距离因子。图 5 为实验示意图和现场图。实验场地为学校篮球场,VLP-16 激光雷达通过三角架固定,目标尺寸为 200 mm×500 mm,通过固定装置将旋转台和转接装置固定在三角架上。实验目标选择了聚四氟乙烯板、木板、水泥板、白色帆布料、瓷砖、铝板等生活和城市建筑中常见材料,各种目标均匀性较好。白色帆布通过贴片胶水贴在相应尺寸透明亚克力板上。首先在目标距离雷达 5,10,15 m 处,分别获取了水平扫描角为 0°,15°,30°,45°,60°时的目标点云强度。接着固定目标相对 y 轴激光线入射角为 0°,沿 y 轴方向移动目标,从 10 m 处开始,每次移动 5 m,直到目标距离雷达 40 m,记录下相应位置下的点云强度值。数据处理时,通过投影降维的方法来找到目标相关区域。通过对目标区域内点云强度值求取均值作为相应距离和入射角下目标的强度值,在求平均值时剔除偏离整体均值较大的误差点。随着距离的增大,垂直方向上打到目标上的激光数减少。为了对比各个距离下的数据,取垂直扫描角为 1°的激光雷达数据进行分析。

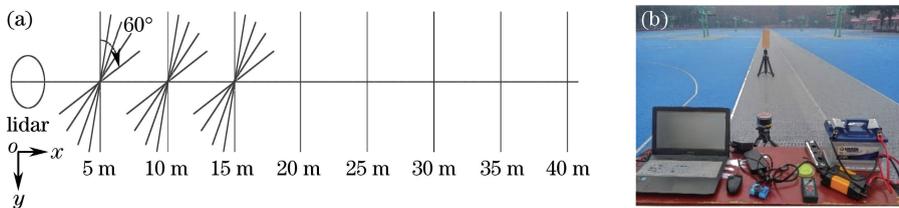


图 5 (a)激光雷达外场实验示意图和(b)现场图

Fig. 5 (a) Schematic and (b) scene of outdoor experiment of lidar

图 6 所示为各种目标的点云强度随入射角度的变化关系。在同一距离下,距离因子 $f(R)$ 可以看作固定值。选择将半椭圆模型的角度因子代入模型中,以拟合相同距离下的强度值随入射角度的变化关系。经过比较发现,当选用线性转换函数时,拟合效果较好,拟合相关性较高。图 6 的曲线为采用线性转换函数和半椭圆模型的角度因子时强度值随入射角度变化关系的拟合曲线。由图 6 可知,5 m 处 6 种目标点云强度整体小于 10 m 处,表明该雷达并不是严格的同轴系统,5~10 m 的范围内存在一个盲区,在该盲区范围内,由于目标反射能量逐渐进入接收视场,反射强度值随距离的增加而逐渐增大,从

而导致 5 m 处的目标强度值比 10 m 处小。

图 7 所示为 6 种目标点云强度随距离的变化曲线,聚四氟乙烯、水泥板、木板、白色帆布这 4 种漫反射目标的强度值随距离的变化关系如图 7(a)所示。可以看出,目标点云强度值随着距离增加而略有降低,但是并不遵循平方反比的下降规律。经过曲线拟合,发现负指数规律能较好地表示目标强度值随距离变化的趋势,表 3 中列出了拟合的距离衰减因子 σ 的值。而铝和瓷砖这两种目标在 0°入射角时发生镜面反射,镜面反射强度随距离的变化关系如图 7(b)所示,可以看出,镜面反射强度值几乎不随距离发生改变。

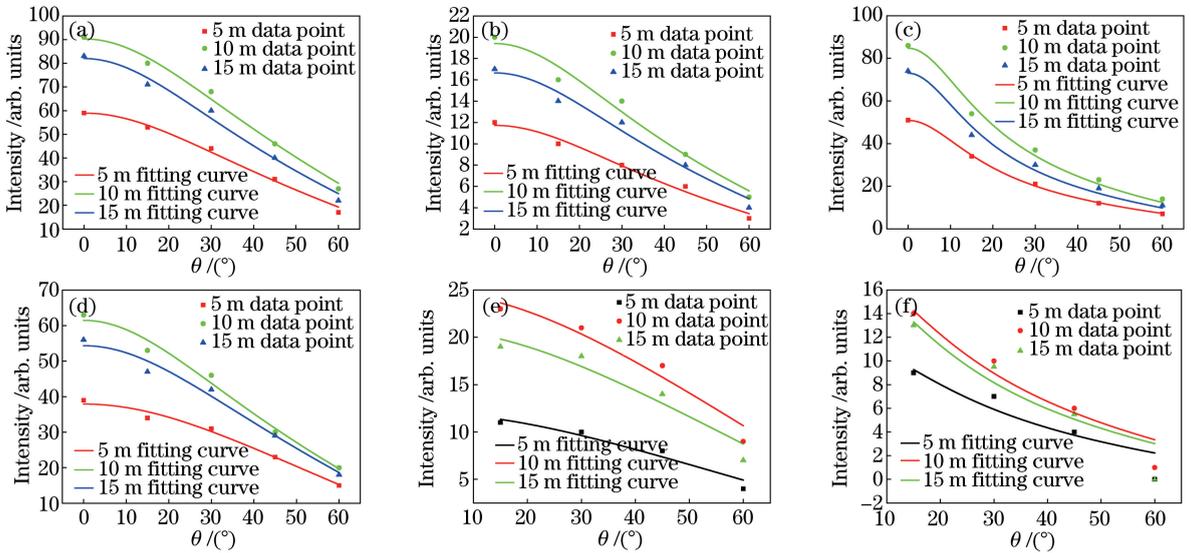


图 6 目标点云强度值随入射角度的变化关系。(a)聚四氟乙烯;(b)水泥板;(c)木板;(d)白色帆布;(e)瓷砖;(f)铝

Fig. 6 Relationship between point cloud intensities and incident angles.

(a) PTFE; (b) cement; (c) wood; (d) white canvas; (e) glazed tile; (f) aluminum

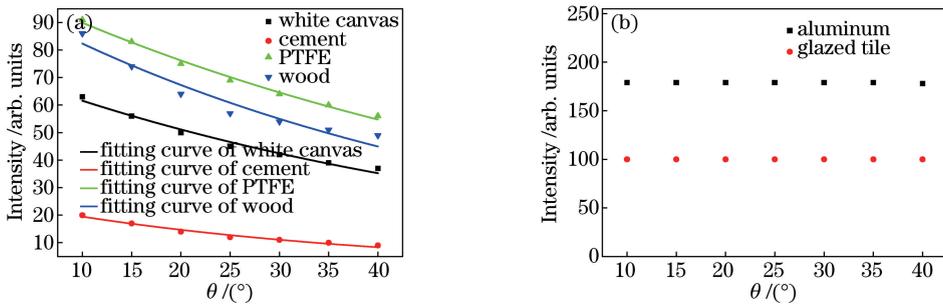


图 7 0°入射角下强度值随距离的变化关系。(a) 4 种漫反射目标;(b) 2 种镜面反射目标

Fig. 7 Relationship between intensity and distance at 0° incident angle. (a) Four diffuse targets (b) two mirror targets

综合以上实验规律,该类型扫描激光雷达的目标强度值为

$$I = \begin{cases} K_1, & I \geq I_T \text{ and } \theta \leq \theta_T \\ K_2 \cdot \exp(2\sigma R) \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{\frac{1}{\kappa^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta}}, & I \leq I_T \text{ and } \theta \geq \theta_T \end{cases}, \quad (8)$$

式中: K_1 和 K_2 为特征参数, K_1 可表征强镜面反射目标的镜面反射能力的强弱, K_2 可表征目标漫反射能力的强弱; σ 为距离衰减因子; κ 为椭圆长短轴之比,可表征漫反射能量的空间分布; I_T 和 θ_T 为目标强度阈值和入射角度阈值。瓷砖,铝等镜面反射目标在 0° 角附近发生的较强镜面反射,其强度值不随距离发生显著变化;但在非 0° 入射角下发生漫反射,故将其在非 0° 入射角下的强度值归入目标的漫反射强度值。漫反射强度值的信号转换函数为线性转换函数,随距离呈负指数规律变化,半椭圆模型的角度因子可以描述目标漫反射强度值随角度的变化

关系。表 3 列出了本次实验得到的 2 种镜面反射目标的 K_1 和 κ ,以及 4 种漫反射目标的 K_2 、 κ 和 σ 值。

表 3 6 种目标 K_1 、 K_2 、 λ 和 σ 值

Target	K_1	K_2	λ	σ
PTFE		106	1.68	-0.0083
Cement		26	1.88	-0.0102
Wooden		101	4.00	-0.0097
White canvas		74	1.32	-0.0089
Glazed tile	100		1.25	
Aluminum	178		3.21	

5 目标反射特征提取实验的分析及讨论

根据实验得到的激光雷达强度值模型[(8)式], 共有3个表征目标反射特性的参数。其中对于镜面反射目标, 只需要目标在 0° 入射角附近的一个强度值便可反演得到表征目标镜面反射能力的特征参数 K_1 ; 而对于漫反射目标, 至少需要同一目标在3个不同距离和入射角下的强度值才能反演得到表征目标漫反射特性的参数 K_2 和 κ 。在真实应用场景中, 扫描激光雷达一般安装在无人车或者移动机器人上, 其在不同时刻会运动到不同位置, 对于同一目标, 便可获得不同距离和入射角下的强度值, 从而使强度值模型具有一定的实际应用价值。

为了简单地验证模型的准确性和实用性, 设计了如下实验: 通过在一条直线上移动目标来模拟雷达的直线运动, 选取8个不同位置记录相应目标回波强度。每次选择其中5个不同位置下的强度值代入(8)式来反演相应目标特征参数 K_2 和 κ 。根据(8)式, 需要获得每个位置对应的目标强度值、距离

值和入射角。强度值和距离值可以直接由雷达返回数据得到, 入射角可以根据点云坐标信息拟合目标直线和入射光线来计算。实验时选择了聚四氟乙烯、水泥板、木板和瓷砖4种材料。目标相对雷达摆放位置如图8(a)所示。4种材料在8个位置下的强度值如图8(b)所示。图8(c)和图8(d)分别为反演得到的不同目标的 K_2 值和 κ 值的范围。

对比图8(c)、(d)和表3的数据, 可以发现: 反演得到的聚四氟乙烯、水泥板、木板3种材料的 K_2 值和 κ 值与表3中数据较为接近; 对于瓷砖, 由位置4下的强度值能得到瓷砖的 K_1 值为100, 与表3中数据接近, 而反演得到的瓷砖 κ 值也与表3对应数据较为接近。由此可见, 将同一目标在不同距离和入射角下的强度值代入建立的模型中, 就能较好地反演得到目标反射特征参数。由图8(c)、(d)的数据还可以看出, 当只用单一 K_2 值区分目标时, 目标的漫反射能力接近, 可能导致反演得到的 K_2 值较为接近, 如图8(c)中聚四氟乙烯和木板, 而此时利用参数 κ 可以进一步区分反射能力接近的2种目标。

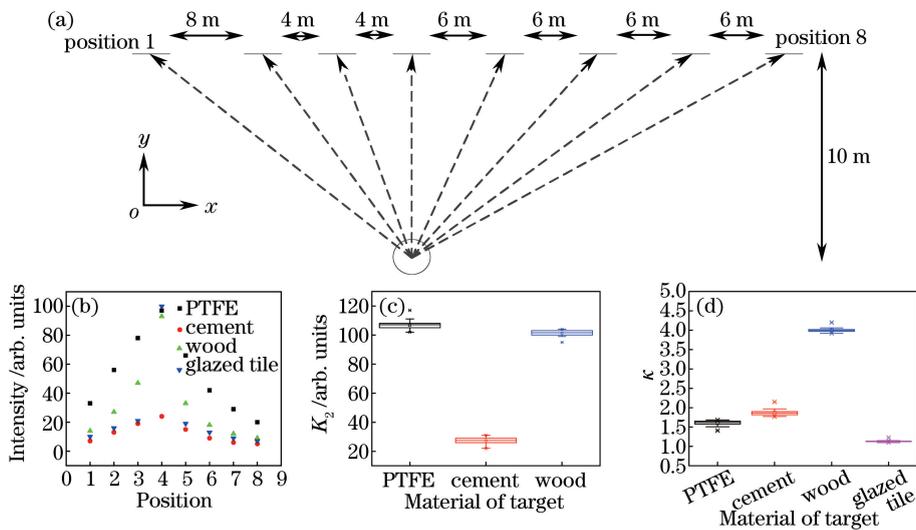


图8 (a)目标和雷达相对位置图;(b)不同位置处目标强度值;(c)反演得到 K_2 值范围;(d)反演得到 κ 值范围

Fig. 8 (a) Relative positions of target and lidar; (b) intensity of different targets at different positions; (c) range of K_2 obtained by inversion; (d) range of κ obtained by inversion

6 结论

基于激光雷达方程相关理论, 在考虑激光雷达后续信号处理修正的基础上, 对激光雷达强度值进行了理论建模。并通过实验确定了模型的角度因子、信号转换函数以及距离因子的具体形式, 得到了一个能联系目标反射特征参数与激光强度值的关系模型。在实际应用中, 可以结合雷达的运动获得同

一目标在不同距离和方位角下的强度值, 然后根据建立的关系模型来提取参数 K_1 , K_2 和 κ 。这类参数表征了目标的反射特性, 在目标的分类识别中具有重要作用, 对于辅助区分两类几何特征相似的目标具有重要意义。后续可在本研究的基础上, 利用得到的模型结合不同应用场景提取目标反射特征参数, 以实现目标的分类。

参 考 文 献

- [1] Liu B, Zhang J, Lu M, *et al.* Research progress of laser radar applications[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 117-122.
刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. *激光与红外*, 2015, 45(2): 117-122.
- [2] Azim A, Aycard O. Detection, classification and tracking of moving objects in a 3D environment[C]. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, June 3-7, 2012, Alcalá de Henares, Spain. New York: IEEE, 2012: 802-807.
- [3] Korchev D, Cheng S, Owechko Y, *et al.* On real-time lidar data segmentation and classification[C] // *International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition*, 2013.
- [4] Kidono K, Miyasaka T, Watanabe A, *et al.* Pedestrian recognition using high-definition LIDAR [J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2011, 29(10): 405-410.
- [5] Tan K, Cheng X J. Adaptive unsupervised classification of TLS point cloud based on intensity data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 032801.
谭凯, 程效军. 基于强度数据的地面激光点云自适应非监督分类[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 032801.
- [6] Cai Y, Xu W B, Liang D, *et al.* Distinguishing *phyllostachys edulis* age based on laser scanning intensity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0110003.
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 基于激光回波强度判别毛竹年龄[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0110003.
- [7] Kaasalainen S, Jaakkola A, Kaasalainen M, *et al.* Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: search for correction methods [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(10): 2207-2221.
- [8] Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: data and model-driven approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(6): 415-433.
- [9] Cheng X L, Cheng X J, Li Q, *et al.* Laser intensity correction of terrestrial 3D laser scanning based on sectional polynomial model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 112802.
程小龙, 程效军, 李泉, 等. 基于分段多项式模型的地面三维激光扫描激光强度改正[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 112802.
- [10] Li Q, Cheng X J, Tian R, *et al.* Correction and normalization of multi-scan terrestrial three-dimensional laser scanning intensity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 122802.
李泉, 程效军, 田芮, 等. 多站地面三维激光扫描强度数据纠正与归一化[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 122802.
- [11] Pfeifer N, Höfle B, Briese C, *et al.* Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data [J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37: 1045-1052.
- [12] Dai Y J. Principle of laser radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [13] Li X L, Liang Y, Xu L J. Bidirectional reflectance distribution function based surface modeling of non-Lambertian using intensity data of light detection and ranging[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(9): 2055-2063.
- [14] Pfeifer N, Dorninger P, Haring A, *et al.* Investigating terrestrial laser scanning laser scanning intensity data: quality and functional relations[C] // *8th Conference on Optical 3D Measurement Techniques*, 2006: 328-337.
- [15] Phong B T. Illumination for computer generated pictures[J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [16] Li X L, Ma L, Xu L J. Empirical modeling for non-Lambertian reflectance based on full-waveform laser detection[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(11): 116110.