

基于单光子探测的目标光学散射特性研究

李致廷^{1,2,3}, 刘长明⁴, 王与焯^{1,2,3}, 常继英^{1,2,3}, 陈 锴^{1,2,3}, 李吉宁^{1,2,3}, 钟 凯^{1,2,3}, 徐德刚^{1,2,3*}, 姚建铨^{1,2,3}

1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072;
4. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 研究了目标物体的单光子散射回波特性, 基于红外单光子探测器和皮秒激光器搭建了目标光学散射特性测量系统, 以回波光子数作为单光子条件下目标光学散射特性的表征。实验研究了不同形状(球体、立方体、圆柱体、圆锥体)目标物体的单光子散射特性, 并利用双向反射分布函数模型对实验结果进行拟合, 理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合。进一步对不同材质(瓷砖、木材、外墙砖)目标物体的单光子散射特性进行了研究, 并将实验结果与传统波动散射特性进行了对比分析。该研究为单光子激光雷达远距离目标识别与探测的相关工作提供了参考。

关键词: 单光子散射; 目标光学散射特性; 回波光子数; 单光子激光雷达; 双向反射分布函数
中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210825

Research on optical scattering characteristics of targets based on single photon detection

Li Zhiting^{1,2,3}, Liu Changming⁴, Wang Yuye^{1,2,3}, Chang Jiyong^{1,2,3}, Chen Kai^{1,2,3},
Li Jining^{1,2,3}, Zhong Kai^{1,2,3}, Xu Degang^{1,2,3*}, Yao Jianquan^{1,2,3}

1. Institute of Laser and Optoelectronics, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Micro Optical Electronic Mechanical System Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Qingdao 266555, China)

Abstract: The single photon scattering echo characteristics of targets were studied in this paper. An optical scattering characteristic measurement system was built based on infrared single photon detector and picosecond laser. The number of echo photons was used to characterize the optical scattering characteristics under the condition of single photon detection. In this experiment, the single photon scattering characteristics of targets with different shapes (sphere, cube, cylinder and cone) were studied. And the results were fitted by using the bidirectional reflection distribution function model. The experimental results were in good agreement with the theoretical fitting ones. Further, the single photon scattering characteristics of targets with different materials (ceramic tile, wood and wall brick) were studied, which were compared with the traditional wave scattering

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金 (U1837202)

作者简介: 李致廷, 男, 硕士生, 主要从事单光子激光雷达方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 徐德刚, 男, 教授, 博士, 主要从事全固态激光、太赫兹、激光光谱成像、光电子技术应用、激光雷达等方面的研究。

characteristics. This study provides a reference for the long-range target recognition and detection of single photon lidar.

Key words: single photon scattering; target optical scattering characteristics; echo photon number; single photon lidar; bidirectional reflectance distribution function

0 引言

激光雷达是一种可以准确、快速获取目标物体三维信息的主动探测技术,在目标识别、探测以及高精度三维成像方面有着独特的技术优势,其应用领域和发展前景十分广阔。单光子激光雷达由于具有单光子级别的探测灵敏度和皮秒量级的时间分辨率,近年来被广泛应用于远距离目标的识别与探测,是激光雷达重要的发展方向^[1-4]。自 20 世纪 90 年代以来,美国麻省理工学院林肯实验室一直致力于小型化低功耗的单光子激光雷达系统的研发与改进,并先后报道了包含 Gen 系列和 Jigsaw 系列在内的多款单光子激光雷达系统^[5-8]。此后研究者们从多个方面对单光子激光雷达展开了深入的研究。

目标光学散射特性是单光子激光雷达领域的一项重要研究内容,它直接决定着激光雷达系统对目标识别与探测的准确率^[9-10]。当前,国内外学者针对物体的目标光学散射特性已开展了大量研究。2010 年, Zhang 等人对水泥板、锻钢和聚酰亚胺薄膜进行了散射回波特性的测量,并分析了不同材料的回波特性随散射角的变化情况^[11]。2011 年, Bhandari 等人采用波长分别为 405 nm 和 680 nm 的光束对反射标准板进行散射回波的测量,实验结果表明激光入射角以及入射和反射光的偏振态都会对反射标准板的回波特性产生影响^[12]。2012 年, Bai 等人在激光波长为 266 nm 和 369 nm 处,对大范围入射角下的粗糙铝板和光滑漆面进行了散射回波的测量,并采用七参数模型对实验数据进行了拟合^[13]。2015 年, Li 和 Liang 建立了目标散射回波模型,并开展实验对水泥混凝土、外墙砖和室内瓷砖三种建筑材料的散射特性进行测量,证明了模型的准确性^[14]。2016 年, Chua 等人测量了木材、纸张、塑料和钢铁的目标散射特性,研究了目标反射率和激光入射角对激光雷达测距精度的影响^[15]。2020 年, Zhou 等人以改进的激光雷达方程为基础,测量并研究了水泥混凝土和外墙砖的目标光学散射特性对阵列 Gm-APD 触发概率的影响^[16]。总体来看,目前关

于目标光学散射特性的研究大多是在强光条件下对目标物体的传统波动散射特性进行测量与分析,但是对于单光子激光雷达系统来说,需要对目标物体的单光子散射特性进行更加深入的探索与研究,而目前国内针对单光子散射特性的实验研究相对较少。

文中基于红外单光子探测器和皮秒激光器搭建了单光子散射回波特性的测量系统,并开展了单光子条件下的目标光学散射特性研究。首先对不同形状的目标物体进行了光学散射特性的测量,利用回波光子数对目标的光学散射特性进行表征,并采用 Blinn-Phong 模型对实验结果进行拟合,理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合。然后,进一步对不同材质的目标物体进行了单光子散射特性的测量,并将实验结果与强光条件下传统光电探测器的实验结果进行了对比分析。该研究为单光子激光雷达远距离目标识别与探测的相关工作提供了参考。

1 理论分析

双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) 是研究目标光学散射特性的经典模型。传统的 Blinn-Phong-BRDF 模型综合考虑了光与物体相互作用时发生的漫反射、镜面反射和环境光反射过程,可以对目标物体的光学散射过程进行描述。文中将其与单光子激光雷达方程进行结合,从而计算出目标回波的准确情况,最终采用回波光子数对目标物体的光学散射特性进行表征。

图 1 为目标物体表面发生光学散射过程的示意图,其中 \vec{n} 为法线向量, \vec{l} 为从目标指向光源的向量, \vec{v} 为从目标指向观察者的向量, \vec{r} 为理想镜面反射向量,这里所有向量均为单位向量。漫反射光向所有方向均匀反射,其光强为:

$$I_d = \rho_d I_d^i \cos \theta_i = \rho_d I_d^i (\vec{l} \cdot \vec{n}) \quad (1)$$

式中: I_d^i 为漫反射光入射光强; I_d 为视点方向的漫反射光光强; ρ_d 为漫反射系数,其是材料本身的一种物理属性。镜面反射是“镜面高光”的成因,理想的镜面

将所有的光线严格按照等于入射角的出射角方向反射,但实际过程中镜面反射光线会有一些扩散,其光强为:

$$I_s = \rho_s I_s^{in} (\cos \psi)^m = \rho_s I_s^{in} (\vec{h} \cdot \vec{n})^m \quad (2)$$

式中:指数因子 m 用来表征镜面反射的强弱; ρ_s 为镜面反射系数; \vec{h} 为二分向量,是平分光源向量和观察向量夹角的单位向量,表达式为:

$$\vec{h} = \frac{\vec{l} + \vec{v}}{\|\vec{l} + \vec{v}\|} \quad (3)$$

环境光是指来自所有方向而不是光源方向的光,此处用来等效背景噪声,其光强为:

$$I_a = \rho_a I_a^{in} \quad (4)$$

式中: ρ_a 为环境反射系数。进一步,考虑到 BRDF 模型必须满足能量守恒定律,引入半球定向反射率 $R(\vec{l})$ 来衡量 BRDF 模型的能量守恒程度,表达式为:

$$R(\vec{l}) = \iint f(\vec{l}, \vec{v}) \cos \theta_r d\omega_r \quad (5)$$

结合能量守恒定律可以解得镜面反射项的修正系数为:

$$k = \frac{(m+2)(m+4)}{8(2^{-\frac{m}{2}} + m)} \approx \frac{m+8}{8} \quad (6)$$

根据公式 (1)、(2)、(4)、(6) 可以得到描述目标物光学散射特性的 BRDF 解析表达式为:

$$f(\vec{l}, \vec{v}) = \frac{\rho_a \cdot (\vec{l} \cdot \vec{n}) + \frac{(m+8)\rho_s \cdot (\vec{h} \cdot \vec{n})^m}{8} + \rho_a}{\rho_d + \rho_s + \rho_a} \quad (7)$$

激光雷达方程是描述激光发射探测与目标散射回波的重要方程,考虑到光子探测效率,对其进行修正可以得到定量描述回波光子数的单光子激光雷达方程:

$$N = \frac{\eta I_r}{h\nu} = \frac{\eta}{h\nu} \cdot \frac{I_t}{\pi R^2 \theta_B^2} \cdot \frac{\sigma}{\pi R^2} \cdot A_r T^2 \eta_1 \eta_2 \quad (8)$$

式中: N 为回波光子数; η 为 Gm-APD 的光子探测效率; h 为普朗克常量; ν 为激光频率; I_t 为单脉冲能量; R 为目标距离; θ_B 为光束发散角; A_r 为接收口径; T 为大气单程透过率; η_1 和 η_2 分别为发射和接收光学系统的透过率; σ 为激光雷达散射截面。其具体的数学表示为:

$$\sigma = \iint 4\pi f(\vec{l}, \vec{v}) \cos \theta_i \cos \theta_r dS \quad (9)$$

式中: $f(\vec{l}, \vec{v})$ 为公式 (7) 中得到的 BRDF。

由上述推导可知,目标物体的光学散射特性可以通过公式 (8) 中的回波光子数来进行表征,结合实验数据可以得到目标物体的散射特性参数值,进而对实验结果进行理论拟合。

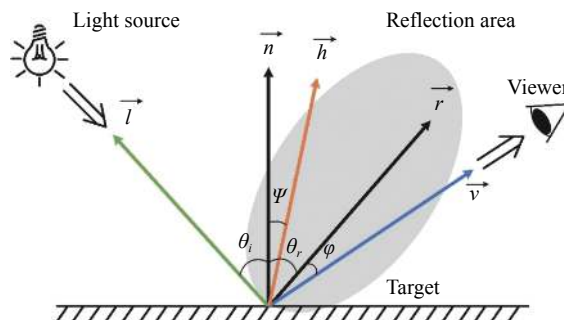


图 1 BRDF 原理图

Fig.1 Schematic diagram of BRDF

2 实验装置

单光子散射特性测量系统如图 2 所示。实验中采用的红外单光子探测器为 InGaAs 材质盖革模式雪崩光电二极管 (Geiger Mode Avalanche Photodiode, Gm-APD), 响应波段为 900~1700 nm, 光子探测效率为 10%, 探测门宽为 3 ns, 工作频率为 100 MHz, 暗计数率为 800 Hz, 死时间为 200 ns, 对应的系统最高计数率为 5 MHz。光源采用工作波长为 1550 nm 的光纤激光器, 脉冲宽度为 50 ps, 脉冲重复频率为 100 MHz, 发射激光的偏振态为线偏振且在实验过程中不发生改变。为进行单光子散射回波的探测, 激光器输出功率设定为最小值 72.5 μW, 对应单脉冲激光能量为 7.25×10⁻¹³ J。激光器的输出端接入数值孔径为 0.25 的光纤准直器, 以获得近平行光输出。接收端通过一个放大倍数为 20 倍、接收口径为 25 mm 的显微物镜将接收到的散射回波信号耦合到单模光纤中, 再传输至探测器。实验全程在封闭的暗室中进行, 可以忽略环境光噪声和大气湍流扰动对实验结果的影响, 暗计数噪声在后期数据处理时进行剔除。发射和接收光学系统光轴间的夹角为 3°, 构成准单站测量系统, 目标物体与光学散射特性测量系统之间的距离为 40 cm, 照射在目标物体上的激光光斑直径为 8 mm。实验中将目标物体放置于旋转精度为 0.075° 的旋转

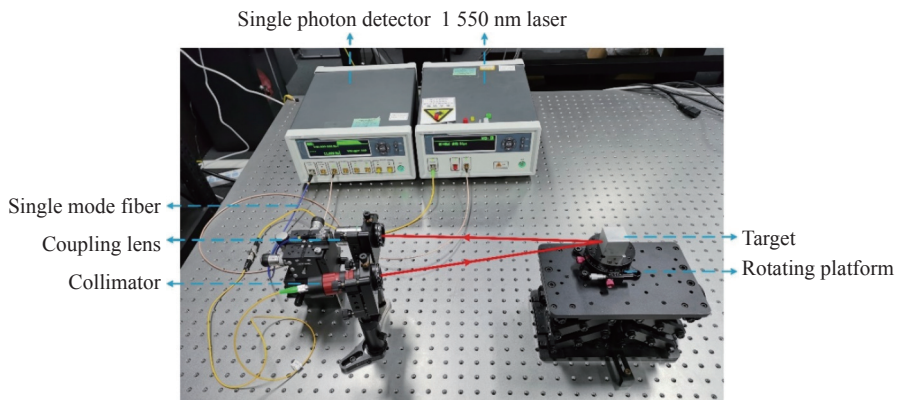


图 2 单光子散射测量系统

Fig.2 Single photon scattering measurement system

台上,在单脉冲激光能量为 7.25×10^{-13} J 的条件下,利用旋转台改变目标物体的旋转角度,通过红外单光子探测器记录目标物体在不同旋转角度下的回波光子数来表征其光学散射特性。

3 实验结果与讨论

3.1 不同形状物体光学散射特性测量

实验中对球体 (直径 $R=3$ cm)、立方体 (棱长 $L=3$ cm)、圆柱体 (底面直径 $D=3$ cm, 高度 $H=3$ cm) 和圆锥体 (底面直径 $D=1.8$ cm, 高度 $H=3$ cm) 这四种不同形状的物体进行单光子散射特性的测量,实物图如图 3 所示,样品材质均为不锈钢金属。

测量过程中激光垂直入射到目标物体表面的几何中心位置,图 3(a)~(c) 中所示平面分别为球体、立方体和圆柱体的 0° 入射面,图 3(d) 中所示平面为圆锥体的 90° 入射面,圆锥尖顶处对应 0° 入射面。改变目标物体的旋转角度,对回波光子数进行测量。对球体、立方体和圆柱体旋转 90° 进行测量,对圆锥体旋转 180° 进行测量,得到的不同形状目标物体的回波光子数如图 4 中黑色圆点所示。图 4(a) 中球体具有完美的对称性,其光学散射特性不随角度发生变化,因此在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内,其回波光子数几乎不发生变化,近似为一条直线。此处针对球体的实验结果同时表明,文中搭建的单光子散射回波测量系统具有较高的稳定性和准确性。图 4(b) 中立方体在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内有两个峰,分别出现在两个表面 0° 和 90° 处,且回波光子数基本相同。在峰值附近,光子数下降迅速,并在很大的角度范围内保持着一个低光子数的状态,

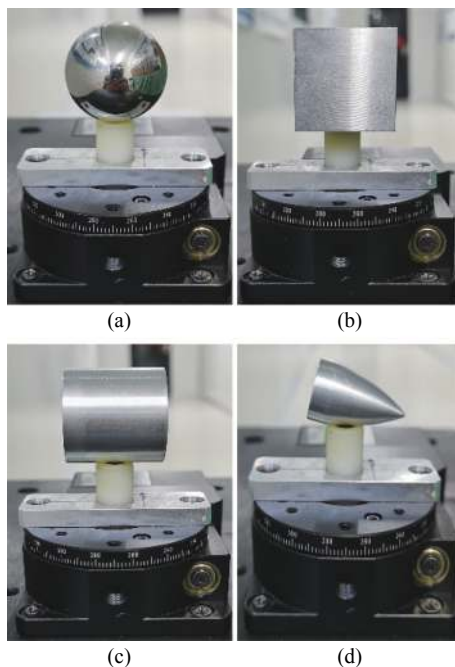


图 3 (a) 球体; (b) 立方体; (c) 圆柱体; (d) 圆锥体
Fig.3 (a) Cube; (b) Sphere; (c) Cylinder; (d) Cone

直至下一个峰值的到来。图 4(c) 中圆柱体水平放置,其在 0° 峰值处的回波光子数为 1022 Hz,此处对应圆柱体的侧面;在 90° 峰值处的回波光子数为 2804 Hz,此处对应圆柱体的底面。由于侧面为曲面,底面为平面,因此后者的回波光子数要明显多于前者。从图中还可以看到,在 $20^\circ \sim 75^\circ$ 的范围内圆柱体的回波光子数均保持在一个较低的水平,仅有 600 Hz 左右。图 4(d) 中圆锥体水平放置,其在 0° 和 180° ,即圆锥体的顶点和底面处的回波光子数大致相同;在 90° 峰值处,即圆锥体母线位置处的回波光子数要明显多于顶点和底

面。另外,相较于立方体和圆柱体,圆锥体的谷值更加明显。表 1 为立方体、圆柱体和圆锥体的回波光子数峰值对比。由表可知,由于形状不同,四种目标物体的光学散射特性差异较大,利用文中搭建的实验系统可以对不同形状目标物体的散射峰谷值进行有效的测量。结合上述建立的 Blinn-Phong-BRDF 模型与实验结果,可以得到目标物体的散射特性参数值及向量间的夹角关系,再结合公式 (8) 中的单光子激光雷

达方程,对黑色圆点表示的实验数据进行拟合,最终根据模型得到的拟合结果在图 4 中以红色曲线表示。根据公式 (7) 可知,旋转目标物体,相当于改变了上述模型中的 \vec{l} 向量、 \vec{h} 向量与 \vec{n} 向量之间的夹角,因此会使 BRDF 值发生改变,最终影响回波光子数 N ,使目标物体的光学散射特性发生变化。对比理论拟合与实验结果可知,理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合。

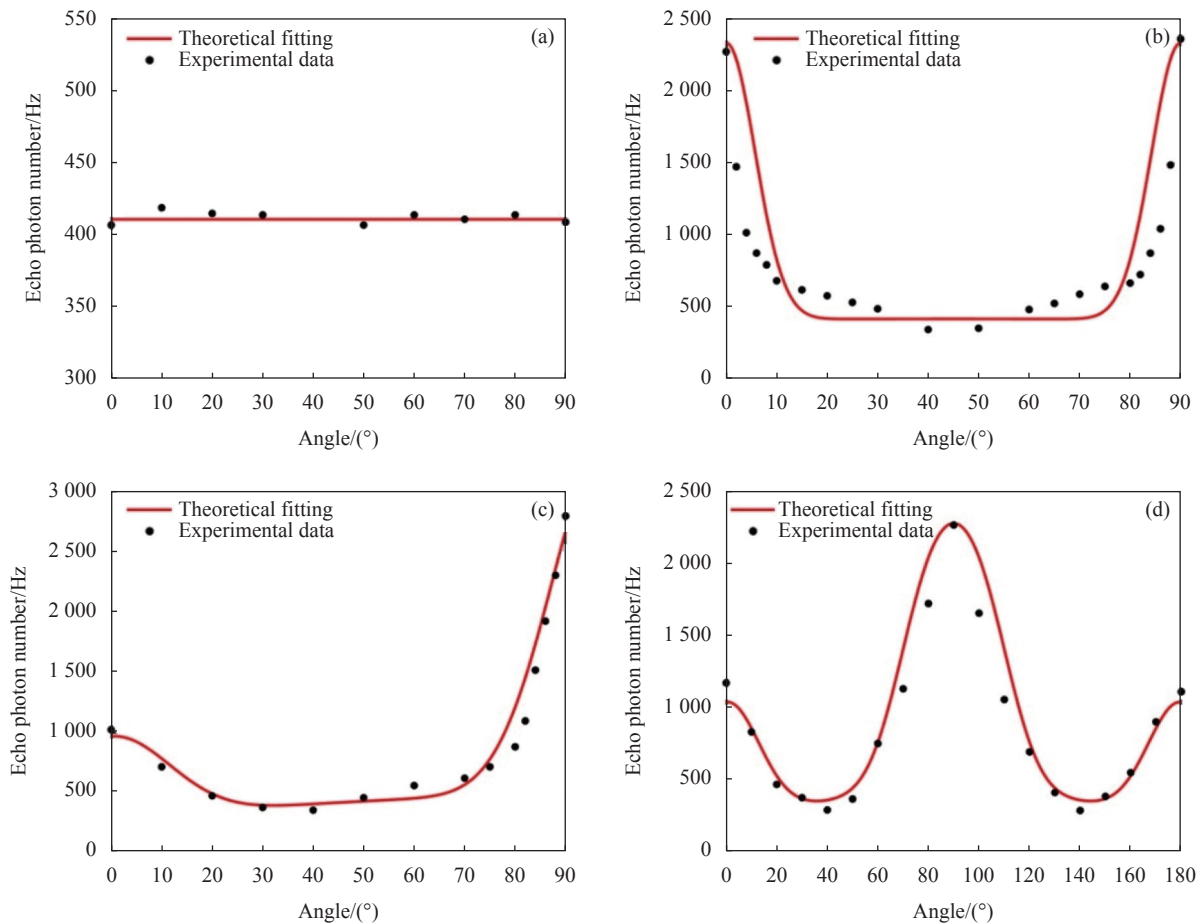


图 4 散射特性。(a) 球体; (b) 立方体; (c) 圆柱体; (d) 圆锥体

Fig.4 Scattering characteristics. (a) Sphere; (b) Cube; (c) Cylinder; (d) Cone

表 1 不同形状物体回波光子数峰值对比

Tab.1 Comparison of echo photon number peaks of objects with different shapes

Peak position/(°)	Cube echo photon number/Hz	Cylinder echo photon number/Hz	Cone echo photon number/Hz
0	2271	1022	1178
90	2359	2804	2274

3.2 不同材质物体光学散射特性测量

进一步研究相同形状、不同材质物体的单光子散

射特性。实验中,对瓷砖、木材和外墙砖三种不同材质的目标物体进行测量,三者的实物图如图 5 所示,

其形状均为长方体 (6 cm×3.6 cm×1.2 cm)。实验中激光垂直入射到目标物体表面的中心位置, 改变目标物体的旋转角度, 用红外单光子探测器对三者进行回波光子数的测量。

图 6(a) 中圆形、方形和三角形分别为瓷砖、木材和外墙砖的单光子散射特性测量结果, 从图中可以看出, 在 0°~90°范围内, 瓷砖、木材和外墙砖的回波光子数均呈现出先下降后上升的趋势, 峰值出现在 0°和 90°的位置, 谷值出现在 45°的位置, 回波光子数表现出瓷砖>木材>外墙砖的规律。红色、绿色和蓝色曲线为利用上述模型对三种目标物体的回波光子数进行拟合的结果。考虑到三种不同材质目标物体的漫反射系数 ρ_d 、镜面反射系数 ρ_s 和指数因子 m 均不相

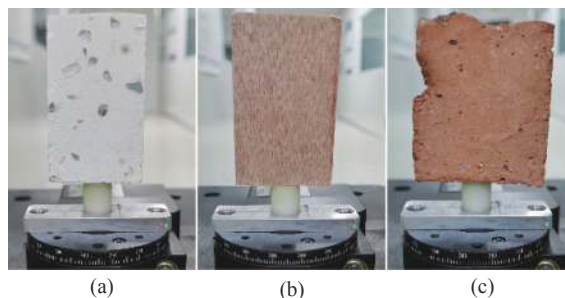


图 5 (a) 瓷砖; (b) 木材; (c) 外墙砖
Fig.5 (a) Ceramic tile; (b) Wood; (c) Wall brick

同, 因此 BRDF 值存在差异, 进而使得回波光子数 N 不同, 最终影响了目标光学散射特性。从图中可以看出, 看出理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合, 该模型对单光子散射特性具有较好的拟合效果。

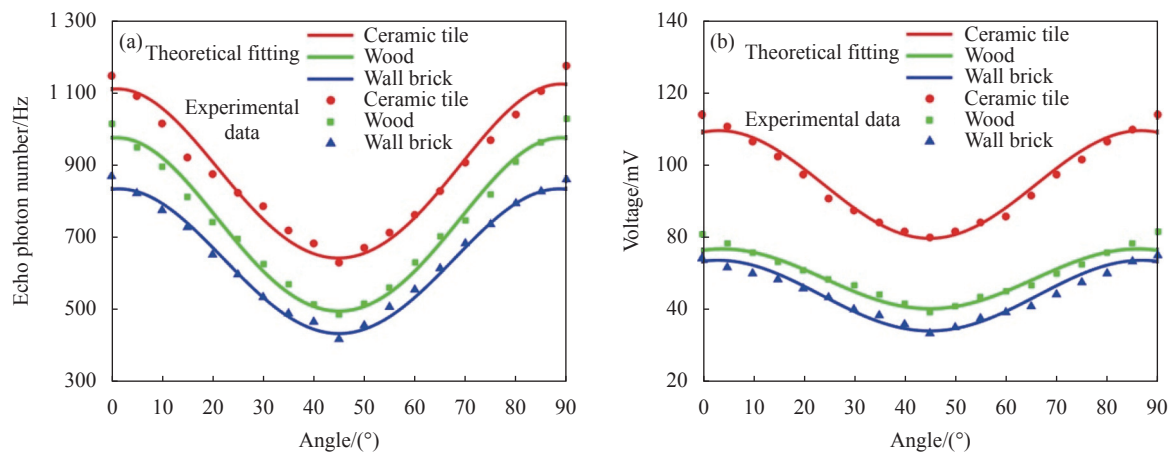


图 6 (a) 单光子探测器及 (b) 传统光电探测器实验结果
Fig.6 Experimental results of (a) single photon detector and (b) traditional photodetector

为了与目标物体的传统波动散射特性进行对比研究, 将探测器更换为传统的 InGaAs 光电探测器 (响应波段为 800~1700 nm, 带宽 5 GHz), 并将激光器功率调高到 0.762 W, 改变旋转角度对目标物体的波动散射特性进行测量。由于光电探测器接收外界的光信号并在其内部将光信号转换为电信号, 因此这里以示波器显示的电压值作为目标物体光学散射特性的表征。瓷砖、木材和外墙砖的传统波动散射特性测量结果分别如图 6(b) 中圆形、方形和三角形所示。由图中可知, 目标物体波动散射强度的变化与图 6(a) 类似, 呈先下降后上升的趋势, 同样为瓷砖>木材>外墙砖这一规律。红色、绿色和蓝色曲线为利用上述模型对三种目标物体的波动散射特性进行拟合的结果, 从

图中可以看出理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合, 该模型对传统波动散射特性具有较好的拟合效果。

综合对比图 6(a) 和图 6(b) 可知, 目标物体的单光子散射特性与传统波动散射特性具有极大的相似性。三种目标物体的回波光子数和波动散射强度均先下降后上升, 出现这一现象的原因在于目标物体是长方体, 当物体的旋转角度为 0°时, 激光正入射到目标物体的前表面上, 镜面反射分量是光学散射的主要来源, 因此回波信号较强。随着物体的旋转角度偏离了镜面反射峰值, 漫反射分量成为了光学散射的主要来源, 回波信号较弱, 在旋转角度到达 45°时, 回波信号达到极小值。当再增大旋转角度时, 目标物体的侧

面逐渐被激光照射到,其漫反射分量也加入到了总的散射回波信号中。随着旋转角度的增大,来自长方体前表面的散射信号强度虽然在减弱,但是来自长方体侧面的散射信号强度却在逐渐增大,而且其增大速度要快于前表面散射信号的减弱速度,因此总散射回波信号逐渐增大。当旋转角度达到 90° 时,激光正入射到长方体的侧面,在此处发生了较强的镜面反射,对应的散射回波信号达到极大值,且与 0° 处的散射峰值相近。对于长方体来说,从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的旋转可以被看成是一个散射周期,当旋转角度再增大时,散射峰谷值的情况将重复这一过程。

横向对比瓷砖、木材和外墙砖这三种目标物体的散射回波情况,可以明显看出在回波信号的强度上呈现出瓷砖>木材>外墙砖的规律,这是因为这三种目标物体的表面粗糙度满足瓷砖<木材<外墙砖的关系,因此其反射率关系为瓷砖>木材>外墙砖。总反射率大,其镜面反射和漫反射分量也都会较大,因此在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的范围内会出现散射信号强度瓷砖>木材>外墙砖的现象。以上规律对目标物体的单光子散射特性和传统波动散射特性均适用。另外,将图6(a)与图4(b)进行对比可以发现,尽管形状相似,但由于材质不同,回波光子数的变化差异较大。图4(b)中立方体的材质为不锈钢金属,在 0° 入射时镜面反射分量占据主导,由于金属的镜面反射分量较大,因此能够收集到较多的回波光子数,当增大旋转角度并偏离镜面反射峰时,漫反射分量占据主导,金属的漫反射分量相对较小,因此回波光子数下降速度较快,造成了图4(b)中曲线变化趋势较陡的现象。图6(a)中长方体的材质分别为瓷砖、木材和外墙砖,相比金属而言三者的镜面反射分量较小且相互之间更为接近,因此在 0° 入射时收集到的回波光子数均较少,但三者的漫反射分量相对较大,因此在旋转角度偏离镜面反射峰时回波光子数的下降速度较慢,造成了图6(a)中曲线变化较缓且趋势相似的现象。文中的实验结果均为线偏振光入射条件下获得的,关于偏振态对单光子探测的影响仍需进行进一步的深入研究。

4 结 论

文中基于红外单光子探测器和皮秒激光器搭建了单光子散射回波特性测量系统,并开展了单光子条

件下的目标光学散射特性测量研究。在单脉冲能量为 7.25×10^{-13} J的输出条件下,基于该系统对不同形状(球体、立方体、圆柱体、圆锥体)目标物体的光学散射特性进行了测量,以回波光子数作为目标光学散射特性的表征,并采用Blinn-Phong-BRDF模型对实验结果进行拟合,理论拟合结果与实验测量结果能够很好地吻合。进一步针对不同材质(瓷砖、木材、外墙砖)的目标物体,将单光子探测器的实验结果与强光条件下光电探测器的实验结果进行了对比分析。该研究为单光子激光雷达远距离目标识别与探测的相关工作提供了参考。

参考文献:

- [1] Laurenzis M. Single photon range, intensity and photon flux imaging with kilohertz frame rate and high dynamic range [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38391-38403.
- [2] Xue Wei, Liu Li, Dai Xiangyang, et al. Moving target ranging method for a photon-counting system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34161-34178.
- [3] Kong H J, Kim T H, Jo S E, et al. Smart three-dimensional imaging lidar using two Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19323-19329.
- [4] McCarthy A, Ren X, Frera A D, et al. Kilometer-range depth imaging at 1550 nm wavelength using an InGaAs/InP single-photon avalanche diode detector [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22098-22113.
- [5] Albota M A, Aull B F, Fouché D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2002, 13(2): 351-370.
- [6] Heinrichs R M, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays[C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4377: 106-117.
- [7] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5086: 1-15.
- [8] Marino R M, Davis W R. Jigsaw: A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, 15(1): 23-36.
- [9] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766. (in Chinese)
- [10] Sun Huayan, Chen Jianbiao, Zhou Zheshuai, et al. Influence of

- target scattering property on laser radar echo characteristics [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(5): 555-559. (in Chinese)
- [11] Zhang Hanlu, Wu Zhensen, Cao Yunhua, et al. Measurement and statistical modeling of BRDF of various samples [J]. *Optica Applicata*, 2010, 40(1): 197-208.
- [12] Bhandari A, Hamre B, Frette O, et al. Bidirectional reflectance distribution function of spectral on white reflectance standard illuminated by incoherent unpolarized and plane-polarized light [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(16): 2431-2442.
- [13] Bai Lu, Wu Zhensen, Zou Xiren, et al. Seven-parameter statistical model for BRDF in the UV band [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12085-12094.
- [14] Li Xiaolu, Liang Yu. Surface characteristics modeling and performance evaluation of urban building materials using LiDAR data [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4750-4759.
- [15] Chua S Y, Wang X, Guo N Q, et al. Influence of target reflection on three-dimensional range gated reconstruction [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6588-6595.
- [16] Zhou Xin, Sun Jianfeng, Jiang Peng, et al. Effect of optical-scattering characteristics with modified kernel-based model on the triggering probability of Gm-APD [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2020, 243: 106814.