

文章编号 1004-924X(2023)21-3077-11

高转速扫描激光雷达中探测器偏离焦平面的应用

周 昊, 毛庆洲*, 胡雪晴, 魏伊可, 张 旭
(武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 为了提高激光雷达测距的动态范围, 解决高转速扫描激光雷达测量远距离目标时的脱靶问题, 提出了探测器偏离焦平面的方法。对远距离回波脱靶现象、探测器在焦平面径向和轴向上偏离的作用原理、回波光斑在焦平面附近的能量分布进行研究。根据目标距离、激光扫描线转速、焦距和离焦量, 分析回波光斑中心相对于光轴的径向偏离角和径向偏离量。当不同距离回波的像平面、光学系统焦平面和探测器靶面之间的相对位置变化时, 分析了回波光斑尺寸在探测器靶面的变化规律。考虑激光高斯光束的能量分布、光学系统孔径光阑、衍射和离焦的影响, 分析了回波光斑在探测器平面的能量分布以及探测器靶面的收光率。最后, 通过数值仿真和实际测试验证了探测器在偏离焦平面后对不同距离回波的收光率的变化规律。实验结果表明: 在 75 Hz 四棱塔镜扫描方式下, 通过调节径向偏离能测到的最远目标距离从约 800 m 提高至约 1 300 m; 通过调节轴向偏离, 保证远距离回波收光率基本不变的情况下, 5 m 目标的收光率可降低约 70%。该方法基本解决了远距离回波脱靶问题, 提高了测距动态范围。

关键词: 激光雷达; 动态范围; 脱靶; 离焦

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233121.3077

Application of detector deviation from focal plane in high speed scanning LiDAR

ZHOU Hao, MAO Qingzhou*, HU Xueqing, WEI Yike, ZHANG Xu

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

* Corresponding author, E-mail: qzhmao@whu.edu.cn

Abstract: In order to improve the dynamic range of LiDAR and to address the issue of off-target measurements in high-speed scanning LiDAR systems when capturing long-range targets, a method that involves deviation of the detector from the focal plane is proposed. The off-target phenomenon of distant targets, the principle of radial and axial deviation of the detector in the focal plane, and the spatial energy distribution of the echo spot near the focal plane are investigated. First, the scanning speed, focal length, and defocusing amount of the laser and the radial deviation angle and radial deviation amount of the echo spot center relative to the optical axis are analyzed according to the target distance. Next, the effect of variation in echo spot size on the detector is analyzed when the relative position relationship between the image plane, the focal plane, and the detector changes. Subsequently, the energy distribution of the echo spot in the detector and the light-receiving efficiency are evaluated, considering the effects of the energy distribution of

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41971413, No. U1934215); 中央高校自主科研项目资助项目 (No. 2042022dx0001, No. 2042023kf0221)

the Gaussian beam, the aperture diaphragm of the optical system, diffraction, and defocusing. Finally, the variation law of the light-receiving efficiency of the target echo at different distances after the detector deviates from the focal plane is verified using numerical simulations and experiments. The experimental results indicate that the farthest target can be measured from approximately 800 to 1 300 m by adjusting the radial offset under the 75 Hz quadrilateral tower mirror-scanning mode. By adjusting the axial deviation, the light-receiving efficiency of the 5 m target can be decreased by approximately 70%, whereas that of the long-range target remains basically unchanged. The proposed method solves the problem of off-target echo in long-range targets and improves the dynamic range of LiDAR.

Key words: LiDAR; dynamic range; off-target; defocusing

1 引 言

激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)是一种快速获取目标三维空间信息的主动探测技术,广泛应用于测绘、遥感、目标检测、轨道检测、导航和自动驾驶等领域^[1-5]。在测量不同距离的目标时,激光雷达返回的回波能量会达到非常大的动态范围,根据激光雷达方程^[6],同一目标在 10 m 和 1 000 m 处的回波能量相差可达 40 dB。为了兼顾更高的测距精度和更远的测距能力,激光雷达常使用脉冲式激光和波形数字化的测距原理^[7]。这就要求回波信号处于高速模数转换(Analog to Digital Converter, ADC)芯片的模拟输入电压范围内,既要保证远距离回波信号高于检测阈值,又要保证近距离回波信号不高于最大电压,避免波形失真导致测距精度严重下降。

为了提高激光雷达的动态范围,常用方法大致分为三类。从电子学角度,通过多路电路放大,实现不同的信号放大倍率,再通过选通模块获得有效信号^[8-9];自动增益控制技术,通过信号反馈调节电路增益系数实现信号的不同放大倍率,但存在反馈周期,不能很好地满足地物多变的测量环境^[10];对数放大器^[11],其对弱信号的放大倍率高,对强信号的放大倍率低,但会加大噪声,使得信噪比降低。从光学角度,使用多光路分光^[8],利用一定的分光比在不同光路获得不同功率的光信号;孔径光阑自动调节技术^[12],通过信号强弱的反馈操控孔径光阑尺寸的变化,改变进入光学系统的光通量,该方法同样存在反馈周期,且需新增机械控制部件,提高系统复杂度;旁轴收发光学系统^[13],通过收发光轴的非同轴设计降低近距离收光率,提高动态范围,缺点是存在测距盲区。在信号处理角度,使用饱和信号的处

理算法^[14]解算近距离饱和信号的测距值,缺点在于饱和信号失真严重,测距精度较差;使用时数转换(Time to Digital Converter, TDC)和 ADC 组合的方式^[15],利用 TDC 对近距离强信号进行测距,ADC 对远距离弱信号进行测距,实现大动态范围测距,该方法也会增加系统的复杂程度。

在高转速扫描激光雷达系统中,激光从发射到目标回波返回存在时间差,会存在不同程度的脱靶现象,导致远距离回波经光学系统聚焦后无法完全被探测器接收,从而限制了测远能力。针对这种现象,胡以华等通过设计调节装置,使得接收视场预先偏离一定角度来保证动态视场与激光束重合,但不同作业航高需设置不同调节档,增加了系统的复杂度^[16]。王春晖等使用会聚光束扫描降低脱靶量,但仅适用于小角度扫描^[17]。Fu 使用校正镜对偏移方向进行实时补偿,需要额外增加扫描补偿机构^[18]。Ito 等使用双楔形镜补偿脱靶量,在增加系统复杂度的同时需要对双楔形镜进行精确控制^[19]。此外,缩短焦距、使用微透镜、半球镜或锥形镜等措施通过增加视场角也能改善脱靶现象,但视场角增大的同时会带来更大的背景噪声。本文提出了一种通过调节探测器靶面和焦平面的相对位置,改变不同距离回波光斑的收光率,从而改善高转速扫描激光雷达的脱靶现象,提高远距离回波收光率的同时降低近距离强回波的收光率,扩大激光雷达的动态范围。

2 原 理

2.1 激光雷达系统组成

本文搭建的激光雷达系统如图 1 所示。其中,激光器用于发射脉冲激光;光学系统用于发射脉冲激光的准直和目标回波的聚焦;扫描机构

用于改变激光出射方向,扫描待测目标;探测器用于将参考光和目标回波进行光电转换;整形及放大电路用于将探测器光电转换后的微弱信号进行整形放大;ADC 采集电路利用高速 ADC 芯片将回波模拟信号进行数字化;控制和信号处理模块用于处理数字化回波信号,并输出测距值,此外还有对激光器、扫描电机和外围传感器等部件的控制。

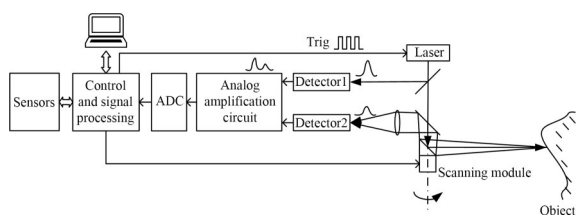


图 1 高转速扫描激光雷达系统组成示意图

Fig. 1 Composition of high speed scanning LiDAR system

2.2 激光雷达动态范围分析

由激光雷达系统组成可知,回波信号分别经过光学系统、光电转换、电路放大、波形数字化及信号处理等步骤后解算为测距值,因此,激光雷达的动态范围由光学动态范围、模拟电路动态范围和数字信号处理动态范围共同决定。

光学动态范围主要通过控制进入探测器的光通量,压缩光信号的动态范围,因此它与模拟电路动态范围和数字信号处理动态的范围相互独立。

电路放大采用多通道放大技术,使用多路不同增益的放大电路同时对信号进行放大,利用多个 ADC 通道采集不同放大倍率的模拟信号时,数字信号处理动态范围最大为:

$$A_D = \sum_{i=1}^k 10 \log \left(\frac{V_{\max}^i}{V_{\min}^i} \right), \quad (1)$$

其中: k 为 ADC 通道数; $V_{\max}^i$ 为第 i 个通道中有效波形信号的最大幅值,由输入波形信号最大幅值、量化位数和信号直流分量决定; $V_{\min}^i$ 为第 i 个通道中有效波形信号的最小幅值,由输入波形信号最小幅值、噪声和信号检测能力决定。

本文在现有基础上改变探测器靶面位置,使得不同距离回波对应的接收光学系统效率发生改变,通过提高光学动态范围达到提高激光雷达动态范围的目的。

2.3 高转速扫描激光雷达中的脱靶现象

在常用的旋转反射镜、多面镜等扫描方式中,由于激光发射到回波接收存在时间差(Δt),在这个时间差内,扫描机构旋转了一定角度,导致目标回波被激光雷达接收时激光焦点与瞬时视场角中心产生偏移,即回波经接收光学系统聚焦位置与探测器靶面中心产生了偏移,如图 2 所示。偏移的角度为:

$$\Delta \theta = 2\pi n \Delta t = \frac{4\pi n R}{c}, \quad (2)$$

其中: n 为激光扫描线转速, R 为目标与激光雷达之间的距离, c 为光速。显然,目标距离越远、激光扫描角速度越高,偏移角度越大。当偏移角度超过视场角后,系统无法接收到回波信号,产生脱靶现象,这会严重影响激光雷达高转速扫描下的远距离测距能力。

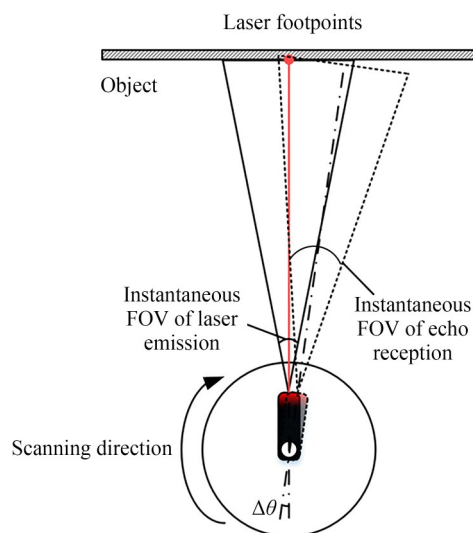


图 2 高转速扫描激光雷达中的脱靶现象

Fig. 2 Off-target phenomena in high scanning speed LiDAR

3 探测器偏离焦平面的作用原理

3.1 径向偏离

根据脱靶现象的特点,如图 3 所示,人为地将探测器靶面朝向着远距离回波聚焦点进行径向偏离,使得远距离回波重新回到视场中,从而解决高转速扫描条件下远距离回波的脱靶问题。

设接收光学系统的焦距为 f ,根据式(2),不

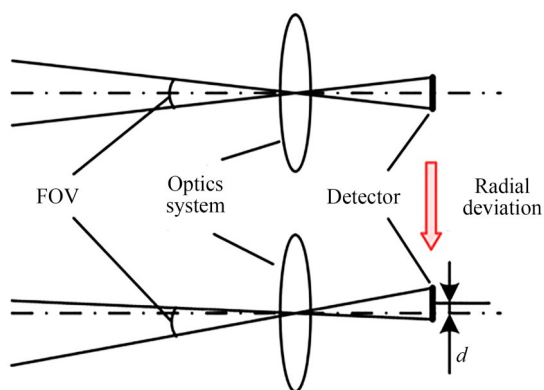


图3 径向偏离示意图

Fig. 3 Schematic diagram of radial deviation

同距离的目标回波中心在焦平面上的位移量为：

$$\Delta x = f \tan \Delta \theta \approx \frac{4\pi n R f}{c} \quad (3)$$

在系统的最高转速和最远测距指标的限制下,回波光斑中心在靶面上的位移在 $0 \sim \Delta x_{\max}$ 之间。由于圆形探测器靶面存在半径为 r 的约束,为保证系统在不同转速下、对不同距离目标的有效探测能力,径向偏离值 d 需要满足：

$$\max \{ |d|, |d - \Delta x_{\max}| \} < r. \quad (4)$$

考虑到实际条件中激光束能量分布、目标物表面特性、离焦、衍射和像差等因素的影响,回波聚焦在探测器靶面上为空间能量分布的光斑,在光斑靠近探测器边缘时,接收到的回波能量也会发生不同程度的衰减。这种衰减无疑会降低远距离回波被接收的能量,从而影响激光雷达的远距离探测性能;而对于近距离回波,根据激光雷达方程,回波能量与距离平方成反比,近距离回波往往过强,导致信号饱和失真,此时衰减反而是有利的。

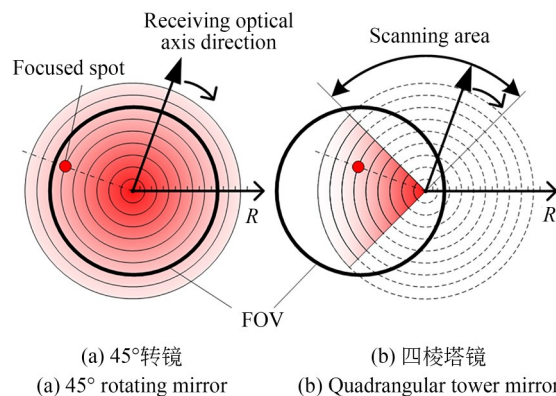
因此,理论上通过合理地调节探测器靶面的径向偏离,能够改善高转速扫描激光雷达中的脱靶现象,提高远距离目标的探测能力,并降低近距离目标的强回波被接收的能量,从而提高激光雷达的测距动态范围。

3.2 扫描方式的影响

扫描方式对脱靶现象有着重要的影响。式(2)中使用激光扫描线转速而非电机转速,是因为激光扫描线转速不仅与扫描机构转速有关,还与扫描方式有关,例如采用四棱镜、激光发射和反射光均处于扫描平面的扫描方式时,激光扫

描线转速为扫描机构转速的两倍^[20]。

当探测器不随扫描机构旋转时,回波光斑的位置不仅随目标距离的变化而变化,还与激光偏折方向有关。例如 RIEGL VUX-1 的 45° 转镜实现的 360° 视场角扫描方式中,脱靶位移量的方向会随转镜角度的变化而变化,相同脱靶量的光斑轨迹最终形成圆环状,无法通过径向偏离的方式解决脱靶问题;而 RIEGL VUX-240 的四棱塔镜扫描方式中,相同脱靶量的光斑轨迹最终形成 $1/4$ 圆弧状,因此能够通过径向偏离的方式解决脱靶问题,如图 4 所示。

图4 45° 转镜和四棱塔镜扫描方式的脱靶光斑轨迹Fig. 4 Off-target spot trajectories in 45° rotating mirror and quadrangular tower mirror scanning modes

3.3 轴向偏离

如图 5 所示,远距离回波可近似为平行光,光斑聚焦在光学系统焦点;近距离回波聚焦在焦点之后的位置,该位置由高斯成像公式^[21]计算获得,即：

$$\frac{1}{R} + \frac{1}{l_i} = \frac{1}{f}, \quad (5)$$

其中 l_i 为像距。一般而言,激光雷达的探测器靶面与光学系统之间的距离是固定的,因此不同距离的回波都会存在一定的离焦。工程应用中,只要保证离焦光斑尺寸小于探测器靶面尺寸,即可保证回波能量全部被探测器接收。

不考虑衍射、像差等因素的影响,点光源在探测器平面的光斑直径 D_d 可以由几何关系得到,即：

$$D_d = \frac{l_i - (f + l_d)}{l_i} D. \quad (6)$$

当离焦光斑尺寸大于探测器靶面尺寸时,仅

有探测器靶面内的回波能量被接收,等效于视场光阑限制了收光孔径。远距离回波能量被衰减对于激光雷达系统而言是不利的,因此常常将探测器靶面固定在光学系统焦点附近或远距离回波能量最大的位置。

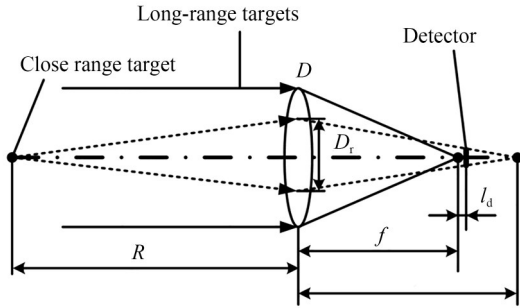


图 5 轴向偏离示意图

Fig. 5 Schematic diagram of axial deviation

近距离回波能量衰减对于激光雷达系统而言是有利的,因此利用探测器靶面轴向偏离的离焦特性,理论上在轴向偏离量合理的情况下,同样能够实现远距离目标的微弱回波能量被全部接收,近距离目标的强回波能量被衰减,进而提高激光雷达系统的测距动态范围。

3.4 回波光斑在探测器靶面上的能量分布

平行光线经过理想光学系统应会聚于一点,实际过程中,由于激光束能量分布、目标物表面特性、异性孔径光阑^[22]、离焦、衍射和像差等多种因素的影响,回波聚焦在探测器靶面上为具有一定空间能量分布的光斑。为方便分析,激光视为高斯光束,目标视为朗伯体平面,并忽略像差的影响。根据高斯光束的传播特性^[23],激光雷达发出的激光在距离为R的目标上形成的光斑光强分布为:

$$I_o(x, y) = I_e e^{-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega^2(R)}}, \quad (7)$$

$$\omega(R) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda R}{\pi \omega_0^2}\right)^2}, \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}, \quad (9)$$

其中: x, y 代表径向的空间位置, $\omega(R)$ 为目标位置光强降为中心光强 $1/e^2$ 处的光束半径, I_e 为光强系数, λ 为波长, ω_0 为束腰半径, α 为激光发散

角。根据高斯成像公式,理想条件下其在像平面的光强分布为:

$$I_i(x, y) = I_e e^{-\frac{2(x^2 + y^2)(R - f)^2}{\omega^2(R)f^2}}, \quad (10)$$

其中 I_e 也为光强系数。考虑衍射和离焦情况,无穷远点光源发出的平行光经异形孔径光阑和光学系统后,像方空间的光强分布为^[22]:

$$I_\delta(x, y) = -\frac{A^2}{\lambda^2(f + \Delta z)^2} \left| F \left\{ t(x, y) e^{j \frac{-k\Delta z}{2f(f + \Delta z)}(x^2 + y^2)} \right\} \right|^2, \quad (11)$$

其中: Δz 为离焦量, A 为入射平面波振幅, k 为波数, $t(x, y)$ 为异形孔径复振幅透过率。

近距离的点目标可以等效为无穷远目标经过凹透镜后,再由光学系统聚焦,如图6所示。此时,该虚拟凹透镜与光学系统组成的等效光学系统的焦平面为近距离点目标的像平面,即等效焦点为像距。

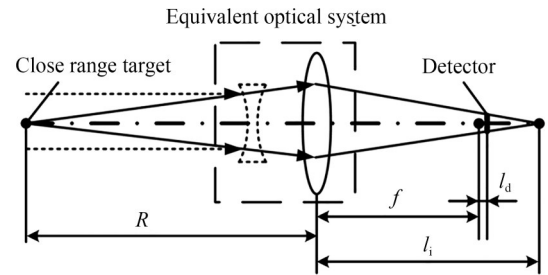


图 6 近距离目标的等效光学系统

Fig. 6 Equivalent optical system for close-range targets

因此,对于近距离目标,式(11)中的等效焦距和等效离焦量随目标距离R的变化而变化,即:

$$f' = l_i = \frac{Rf}{R - f}, \quad (12)$$

$$\Delta z = (f + l_d) - l_i. \quad (13)$$

将点光源的光强三维空间能量分布视为点扩散函数,最终回波光斑在探测器靶面位置的光强分布为:

$$I_d(x, y) = I_i(x, y) * I_\delta(x, y). \quad (14)$$

考虑脱靶现象产生的光斑偏移和探测器径向偏离,此时落在靶面上的能量占比(以下称为收光率)为:

$$\eta = \frac{\int_{-\sqrt{r^2-(x-d)^2}}^{\sqrt{r^2-(x-d)^2}} \int_{-r+d}^{r+d} I_d(x-\Delta x, y) dx dy}{\iint I_d(x, y)} \quad (15)$$

4 实验结果与分析

为了验证上述理论,直观地反映探测器偏离焦平面的影响,以及获得探测器偏离焦平面的实际效果,实验分为数值仿真和实测实验。

数值计算参数设置如下:激光波长 $\lambda=1\ 550$ nm,激光发散角 $\alpha=0.5$ mrad,接收光学系统口径 $D=40$ mm,焦距 $f=32$ mm,探测器靶面半径 $r=100$ μm ,激光扫描线转速 $n=75$ Hz,目标距离 $R=1\sim 1\ 000$ m,光速 $c=299\ 792\ 458$ m/s。其余参数或参数变更会在实验中进行说明。

4.1 径向偏离仿真

设置轴向偏离量 $l_d=0$,即探测器位于焦平面,此时收光率与径向偏离量和目标距离的关系如图 7 所示。

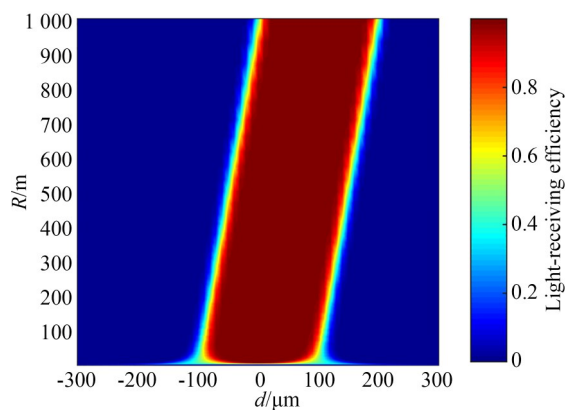


图 7 径向偏离与收光率的关系($n=75$ Hz)

Fig. 7 Relationship between radial deviation and light-receiving efficiency ($n=75$ Hz)

在目标距离较近时,回波光斑基本不产生偏移,当径向偏离量超过探测器半径时,回波收光率减少。当目标距离逐渐变远时,回波光斑产生偏移,此时人为将探测器靶面朝着回波光斑偏移方向进行径向偏离,能够保证远距离回波能量被完全探测,反之则会导致远距离回波收光率急剧下降。径向偏离量超过探测器半径后,中近距离

回波收光率会迅速降低。

目标距离固定的情况下调整径向偏离量,收光率在 $1\sim 0$ 之间存在一定的渐晕,这是因为回波光斑具有一定尺寸,渐晕时仅部分能量被探测器接收。近距离回波收光率降低,渐晕增大,是由于此时成像面位于焦平面之后,探测器靶面上的光斑为离焦图案,光斑增大甚至超过了探测器靶面直径,导致收光率下降。

4.2 轴向偏离仿真

收光率与轴向偏离量和目标距离的关系如图 8 所示。在 $n=0$ Hz, $d=0$ μm 的条件下,远距离回波成像面接近焦平面,近距离回波成像面在焦平面之后,探测器靶面与成像面不一致导致探测器靶面上的光斑出现不同程度的扩大,造成收光率的变化。因此,图 8(a)中随着轴向偏离量的增大,即探测器靶面朝焦后移动,近距离回波的收光率提高,达到一定距离后远距离回波光斑大于探测器靶面半径,收光率降低。反之,探测器靶面朝焦前移动,则会使近距离回波的收光率降低。由于轴向偏移会改变光斑尺寸,为保证某一距离的回波光斑被探测器全部接收,轴向偏离的调节存在一个窗口范围,超出窗口范围后收光率会下降。

当存在脱靶现象时,不同距离的收光率会变化。如图 8(b)所示,在 $n=75$ Hz, $d=0$ μm 的情况下,目标距离越远,光斑中心与靶面边缘越接近,从而导致轴向偏离的窗口范围缩小直至消失。

在加入径向偏离 $d=50$ μm 后,如图 8(c)所示,轴向偏离的窗口范围随着距离的增加先增大后减小。这是由于加入径向偏离后,窗口范围最大时,该距离的回波脱靶量正好为径向偏离量,而远于或近于该距离的回波都偏离靶面中心,造成轴向偏离的窗口范围减小。随着径向偏离量增加至 $d=100$ μm ,如图 8(d)所示,轴向偏离窗口范围最大对应的距离更远,而近距离目标的窗口范围逐渐缩小直至消失。

因此实际应用中,轴向偏离与径向偏离都会影响收光率,径向偏离一方面能够改善远距离目标的脱靶现象,另一方面会影响轴向偏离的窗口尺寸,设计时需要综合考虑。

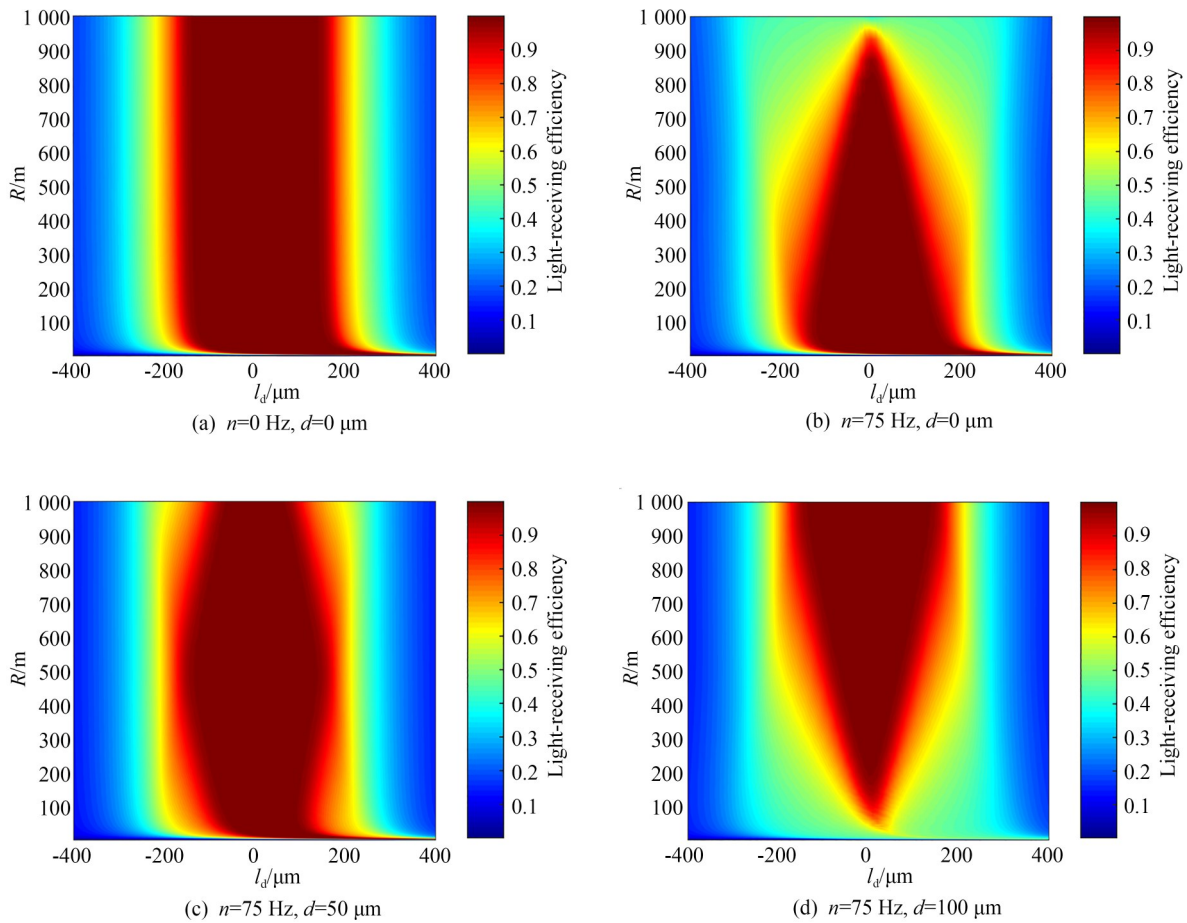


图 8 不同条件下轴向偏离与收光率的关系

Fig. 8 Relationship between axial deviation and light-receiving efficiency under different conditions

4.3 径向偏离实验

为了验证径向偏离的影响,首先使用平行光管将探测器靶面中心与无穷远回波光斑中心调节至重合。实验目标为窗户外建筑物群,激光沿水平面方向扫描(为获取尽可能多的目标,略微调整了俯仰角),扫描方式为四棱塔镜扫描,激光扫描线转速分别设为 10, 75 Hz。每次调节 10 μm 的径向偏离量,并采集建筑物群截面的点云。

从每个点云中以 10 m 为分区统计区域内所有目标亮度的平均值,共 150 个分区,覆盖 0~1 500 m 的目标。最后对同一距离分区的亮度平均值进行归一化,作为收光率。实验结果如图 9 所示。在激光扫描线转速为 10 Hz 时,远距离回波脱靶现象不明显,可以看到实验设备最远能够测到约 1 300 m 处的建筑,径向偏离量在超过

$\pm 100 \mu\text{m}$ 后,所有距离回波的收光率都急剧下降。在激光扫描线转速为 75 Hz,径向偏离量为 0 μm 时,最远仅能测到约 800 m 处的建筑,在反方向增大径向偏离量后,脱靶问题更为严重,远距离回波探测能力随之下降。在增大径向偏离量后,逐步能够测到约 1 100 m 和 1 300 m 的目标,说明高转速下,将探测器进行合理的径向偏离能够解决远距离回波的脱靶问题。在径向偏离量超过 100 μm 后,近距离回波收光率下降而远距离回波收光率仍有较高水平,与理论分析一致。

综上所述,高转速下,探测器朝着远距离回波脱靶方向进行合理的径向偏离后,能保证远距离收光率,解决脱靶问题,也能降低近距离强回波的幅值,提高测距的动态范围。

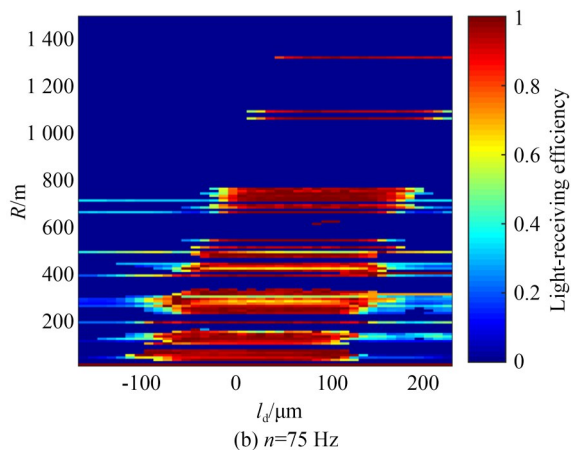
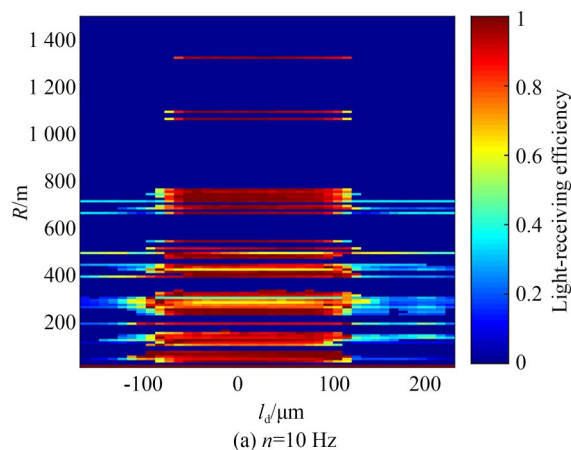


图9 不同条件下径向偏离与收光率的实验结果
Fig. 9 Experimental results of radial deviation and light-receiving efficiency under different conditions

4.4 轴向偏离实验

从仿真结果来看,轴向偏离对近距离回波的影响更为显著。为此,设置了分别距离激光雷达 5, 15, 50 m 的标准反射率板作为待测目标。与径向偏离实验中一样,首先使探测器靶面中心与无穷远回波光斑中心重合。

实验中,激光扫描线转速以 75 Hz 对 3 个目标进行扫描,通过 10 μm 的步进调节轴向偏离量,并分别统计每个目标在点云中的亮度平均值。对每个目标点云的亮度平均值分别做归一化处理,进而转换为收光率。

进行了两组实验,实验结果如图 10 所示。图 10(a)中垂直于脱靶位移方向的径向方向偏差为 0 μm ,图 10(b)中垂直于脱靶位移方向的径向方向偏差为 70 μm 。从结果可以看出,实测收光率

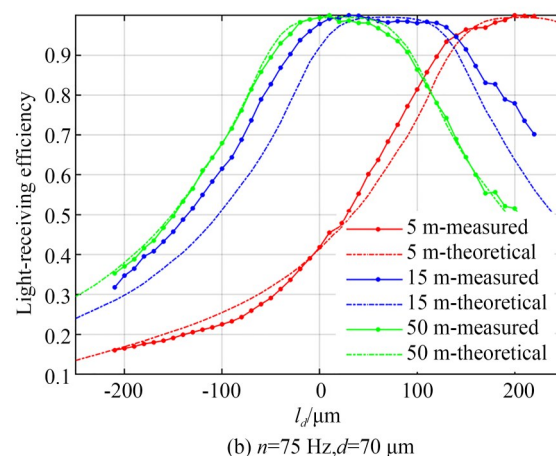
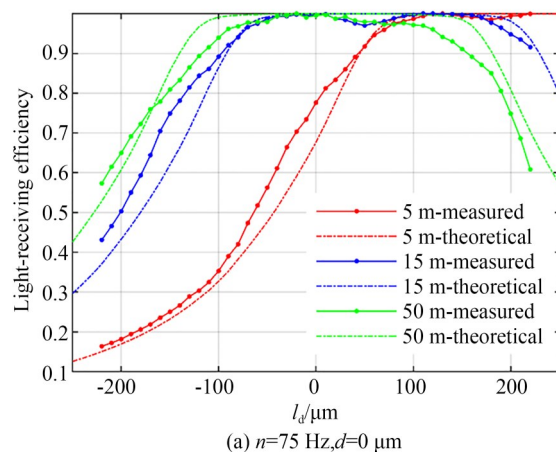


图10 不同条件下轴向偏离与收光率的实验结果
Fig. 10 Experimental results of axial deviation and light-receiving efficiency under different conditions

基本符合理论分析的规律,差异来源可能包括像差、激光与光轴角度偏差、探测器靶面响应均匀性、人工调节误差等因素的影响。当垂直于脱靶位移方向的径向方向偏差从 0 μm 增大至 70 μm 时,最大收光率的轴向偏离量窗口也从约 210 μm 变窄至约 60 μm , 5 m 近距离回波在焦平面处的收光率也从 0.78 降至 0.42, 而远距离回波收光率基本不变。

在第一组实验中,轴向偏离量分别为 -100, 0, 100 μm 时, 50 m 目标的收光率分别为 0.94, 1.00, 0.97, 5 m 目标的收光率分别为 0.35, 0.78, 0.99, 即仅通过调节轴向偏离量,在远距离回波收光率基本不变的情况下,近距离回波收光率可降低约 70%。

综上所述,探测器位于焦前位置,既能保证

远距离收光率,又能降低近距离强回波的幅值,提高测距的动态范围。

5 结 论

为解决高转速扫描激光雷达中的脱靶问题,并在已有的电路和信号处理动态范围的基础上,进一步提高激光雷达的测距动态范围,本文提出了探测器偏离焦平面的方法。首先,介绍了扫描激光雷达的系统组成、动态范围和高转速下的脱靶现象。然后分析了探测器在径向和轴向上偏离的作用效果、回波光斑在探测器

平面位置的分布。最后,通过数值仿真,给出了收光率随目标距离、激光扫描线转速、径向偏离量和轴向偏离量的变化情况,并进行了实验验证。实验结果表明,实测数据基本符合理论模型,在 75 Hz 四棱塔镜扫描方式下,通过调节径向偏离,最远测距目标从约 800 m 提高至约 1 300 m;通过调节轴向偏离,保证远距离回波收光率基本不变的情况下,5 m 目标的收光率可降低 70% 左右。该方法基本解决了远距离回波脱靶问题,提高了高转速扫描激光雷达的测距动态范围,为工程实践提供了理论支撑,具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 李清泉,毛庆洲. 道路/轨道动态精密测量进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1734-1741.
LI Q Q, MAO Q ZH. Progress on dynamic and precise engineering surveying for pavement and track[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1734-1741. (in Chinese)
- [2] 毛庆洲,董翠军,胡伟. 基于移动激光扫描数据的铁路轨顶高程自动提取方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(7): 108-113.
MAO Q ZH, DONG C J, HU W. Method of automatic extraction of rail head elevation based on mobile laser scanning data[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(7): 108-113. (in Chinese)
- [3] 郭晨,许强,董秀军,等. 复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1538-1547.
GUO CH, XU Q, DONG X J, *et al.* Geohazard recognition by airborne LiDAR technology in complex mountain areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1538-1547. (in Chinese)
- [4] 伍锡如,薛其威. 基于激光雷达的无人驾驶系统三维车辆检测[J]. 光学精密工程, 2022, 30(4): 489-497.
WU X R, XUE Q W. 3D vehicle detection for unmanned driving system based on lidar[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(4): 489-497. (in Chinese)
- [5] SHE J X, MABI A W, LIU Z M, *et al.* Analysis using high-precision airborne LiDAR data to survey potential collapse geological hazards[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-10.
- [6] WAGNER W. Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: basic physical concepts[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(6): 505-513.
- [7] 周昊,毛庆洲,李清泉. 采样频率和激光脉宽对全波形激光雷达测距精度的影响[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210363.
ZHOU H, MAO Q ZH, LI Q Q. Influence of sampling frequency and laser pulse width on ranging accuracy of full waveform lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 3788/IRLA20210363. (in Chinese)
- [8] GUO K, LI Q Q, WANG CH SH, *et al.* Development of a single-wavelength airborne bathymetric LiDAR: system design and data processing[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 185: 62-84.
- [9] MA R, LIU M L, ZHENG H, *et al.* A 77-dB dynamic range low-power variable-gain transimpedance amplifier for linear LADAR[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2018, 65(2): 171-175.
- [10] 史茂伟. 脉冲式激光测距系统的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

- SHI Q W. *Research on Pulsed Laser Ranging System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] LIENERT B, PORTER J, AHLQUIST N, *et al.* A 50 MHz logarithmic amplifier for use in lidar measurements [C]. *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)*. July 9-13, 2001, Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2002: 2914-2915.
- [12] 张冰娜, 黄庚华, 舒嵘, 等. 用于大动态范围厘米精度激光测距的孔径光阑自动调整技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1788-1792.
- ZHANG B N, HUANG G H, SHU R, *et al.* Automatic adjustment technology of diaphragm used for large dynamic laser ranging with centimetre grade precision[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1788-1792. (in Chinese)
- [13] SHI G Y, LI S, HUANG K, *et al.* Numerical ray-tracing approach with laser intensity distribution for LIDAR signal power function computation [J]. *Optical Review*, 2016, 23(5): 770-775.
- [14] 朱世贤, 赵毅强, 叶茂, 等. 大动态范围激光雷达回波信号饱和处理算法[J]. *光子学报*, 2018, 47(12): 1228003.
- ZHU SH X, ZHAO Y Q, YE M, *et al.* Saturated echo signal algorithm for wide dynamic range lidar [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(12): 1228003. (in Chinese)
- [15] 白杨, 唐伟, 徐诗月, 等. 激光成像雷达近程大动态范围实时高精度测距方法[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 118-123.
- BAI Y, TANG W, XU SH Y, *et al.* Real-time and high-precision ranging method for large dynamic range of imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(s2): 118-123. (in Chinese)
- [16] 胡以华, 薛永祺, 方抗美, 等. 对地观测激光扫描成像探测效果研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(5): 335-339.
- HU Y H, XUE Y Q, FANG K M, *et al.* Sound-ing effect of laser scanning imaging in earth observa-tion [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(5): 335-339. (in Chinese)
- [17] 王春晖, 顾宗山, 王骥. 会聚光束扫描降低相干激光成像雷达滞后角的方法[C]. 中国光学学会, 中国电子学会. 第十七届全国激光学术会议论文集. 科学出版社, 2005: 111-115.
- WANG CH H, GU Z SH, WANG Q. Reducing lag angle of coherent laser imagine radar using converging beam scanning [C]. *Optical Society of China, Electronics Society of China. Proceedings of the 17th National Laser Conference. Science Press*, 2005: 111-115. (in Chinese)
- [18] SHAO F. Correction of optical lag-angle for mono-static LIDAR sensors [C]. *Proc SPIE 11455, Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications*, 2020, 11455: 751-755.
- [19] ITO Y, IMAKI M, SAKIMURA T, *et al.* Evidence of decreased heterodyne-detection efficiency caused by fast beam scanning in wind sensing coherent Doppler lidar, and demonstration on recovery of the efficiency with lag-angle compensation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-10.
- [20] ZHOU H, MAO Q Z, SONG Y F, *et al.* Analysis of internal angle error of UAV LiDAR based on rotating mirror scanning [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5260.
- [21] 李林. 应用光学: 英文版[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2012.
- LI L. *Applied Optics* [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [22] 金思宇, 刘英, 党博石, 等. 异形孔径光阑成像系统像方空间光强分布计算[J/OL]. *激光与光电子学进展*. (2022-07-17) <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1147.029.html>.
- JING S Y, LIU Y, DANG B SH, *et al.* Calculation of light intensity distribution in image space of imaging system with arbitrary aperture diaphragm [J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*. (2022-07-17). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1147.029.html>. (in

Chinese)

- [23] 夏珉. 激光原理与技术实验[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

XIA M. *Laser Principle and Technology Experiment* [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

作者简介:



周 昊(1997—),男,湖南株洲人,博士生,分别于2019、2022年在武汉大学获得学士、硕士学位,主要从事高分辨率成像激光雷达及信号处理的研究。E-mail: zhouhao2015@whu.edu.cn

通讯作者:



毛庆洲(1977—),男,安徽宁国人,教授,博士生导师,1999年于武汉测绘科技大学获得学士学位,分别于2002、2008年在武汉大学获得硕士、博士学位,主要从事空间智能遥感仪器,高分辨率激光雷达、动态精密工程测量、基础设施结构状态安全监测等技术与装备的研究。E-mail: qzhmao@whu.edu.cn