

文章编号: 1002-1582(2025)06-0656-04

一种激光雷达轴棱锥光学空间滤波器

廖英琦^{1*}, 杨苏辉², 王超¹, 杨丰源¹, 李东¹, 刘玉¹

(1. 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007)

(2. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 在激光雷达探测中, 太阳光等背景光会降低探测的对比度, 影响探测准确度。文章提出在雷达接收端引入轴棱锥和小孔光阑组成的光学空间滤波器抑制背景光。在激光雷达的接收端引入轴棱锥, 可将空间相干的目标探测回波转换为零阶贝塞尔光束; 而背景光无法转换, 只能被会聚。利用小孔光阑, 可在保留激光回波通过的同时遮挡部分背景光。通过仿真软件模拟该空间滤波器对背景光的作用, 仿真结果表明该滤波器可提高探测的对比度; 入射光口径为3mm时, 在轴棱锥焦平面上放置1mm孔径小孔光阑后, 对比度可提升3.5倍。

关 键 词: 背景光; 激光雷达; 轴棱锥; 空间滤波

中图分类号: TN249; TH745

文献标识码: A

An axicon optical spatial dfilter in lidar

LIAO Yingqi^{1*}, YANG Suhui², WANG Chao¹, YANG Fengyuan¹, LI Dong¹, LIU Yu¹

(1. The 28th Reaearch Institute of China Electirionics Technology Group Corporatio, Nanjing 210007, China)

(2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In LIDAR detecting, background light such as sunlight reduces the contrast of daytime LIDAR detection and affects the effectiveness of detection. The use of an optical spatial filter consisting of an axial prismatic cone and a small aperture diaphragm to suppress the background light is proposed. By introducing an axicon at the receiver end of a LIDAR, spatially coherent target detection echoes can be converted into zero-order Bessel beams, while the background light cannot be converted and only be focused. By using a small-aperture diaphragm, the background light can be partially blocked while preserving the laser echo. The effect of the filter on the background light was simulated by Zemax simulation software, which shows that the filter can reduce the background light received by the detector to suppress the background light. When the incident light diameter is 3 mm, the detection contrast can be increased by 3.5 time with a 1mm small aperture diaphragm.

Keywords: background light; Lidar; axicon; spatial filtering

0 引 言

激光具有高相干性和高方向性, 因而激光雷达具有高分辨率、高精度的特点, 在探测中使用广泛, 并且在无人驾驶、无人机测绘等领域中具有广阔应用前景^[1-4]。在日间的激光雷达探测中, 明亮的太阳光等背景光会降低探测的对比度, 甚至淹没激光回波, 降低探测的信噪比, 影响探测

的准确度, 是探测效果的重要影响因素^[5-8]。为抑制太阳背景光, 除信号处理方法外^[9-12], 硬件上可通过缩小接收系统的口径、缩小接收系统视场角的方法, 通过缩小接收视场抑制太阳背景光; 还可在光路上添加滤光片^[13,14], 或者使用法布里-珀罗标准具作为窄带滤波器的方法^[15,16], 通过过滤掉非探测波段的光来抑制太阳背景光。但这些方法并不能完全抑制背景光, 接收视场内的与探测光

收稿日期: 2025-05-03; 收到修改稿日期: 2025-06-12

作者简介: 廖英琦 (1995—), 女, 工程师, 博士, 从事水下激光雷达研究。

* 通讯作者: 1837936162@qq.com

波长相同的背景光仍对探测效果有很大影响。有研究者提出光学空间滤波的方法,使用螺旋相位板制作的轴棱锥,改变背景光和激光回波在空间上的分布并将二者分离,实现对接收视场内的与探测光波长相同的背景光的抑制^[17,18]。基于这一思想,轴棱锥同样可以改变背景光和激光回波在空间上的分布,应用在光学空间滤波中。

轴棱锥常用于贝塞尔光束的生成,可将基模高斯光束相干叠加为零阶贝塞尔高斯光束。相比于基模高斯光束,经轴棱锥生成的零阶贝塞尔高斯光束的能量在中心更加集中,其主光斑的直径更小。激光雷达发射光为基模高斯光束,其目标反射回波保留空间相干性;而太阳光等背景光相干性低,经轴棱锥后无法相干叠加,而是以光强相加的形式会聚。因此在激光雷达的回波光路上放置轴棱锥,则在其出射光焦点处,背景光被聚焦;而激光回波被相干叠加为零阶贝塞尔高斯光束。在轴棱锥后放置小孔光阑,设置小孔光阑尺寸适配零阶贝塞尔高斯光束的主光斑,则小孔外的背景光被遮挡,可实现对背景光的抑制。

本文提出使用由轴棱锥和小孔光阑组成的光学空间滤波器抑制激光雷达日间探测中的太阳背景光,在Zemax仿真软件中建立激光回波和背景光的滤波模型,分别模拟二者通过空间滤波器后的剩余光子分布,分析该方法对背景光的抑制作用,并比较使用不同口径小孔光阑时的抑制效果。仿真结果表明,该方法可以减少探测面对背景光的接收从而抑制背景光,从而提高探测的对比度和准确度;并且小孔光阑口径越小,抑制效果越好。该光学空间滤波器为激光雷达日间探测的背景光抑制提出新方法,并且可以推广到水下、雾霾等场景中抑制背景光、杂散光。

1 原理

轴棱锥也称锥透镜,其厚度成圆锥状,中心最厚,边缘最薄。轴棱锥对入射光起聚焦的作用,如图1所示,一束平面光入射到轴棱锥后,通过其中心的光子传播路程最长,通过其边缘的光子传播路程最短。光子在轴棱锥内的传播距离不同,造成相位延迟,出射光的等相位面从平面波转换为锥面波。

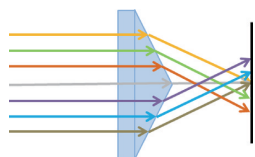


图1 轴棱锥对入射光束的聚焦

1.1 轴棱锥与贝塞尔光束

贝塞尔光束可以看作是在一个锥面上的平面波的相干叠加。在轴棱锥焦点处,高斯光束可被转换成零阶贝塞尔高斯光束,如图2(a)所示;高阶拉盖尔高斯光束可被转换成高阶贝塞尔高斯光束,即涡旋光束,如图2(b)所示。

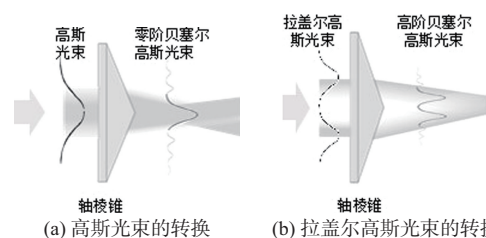


图2 轴棱锥对高斯光束及拉盖尔高斯光束的转换示意图

1.2 轴棱锥光学空间滤波

利用Zemax仿真软件模拟轴棱锥和小孔光阑组成的光学空间滤波器对激光回波和背景光的作用,如图3所示。设置轴棱锥顶角为 5° ,口径为1英寸,将其CAD文件导入Zemax中,设置材料为K9玻璃。设置两束入射光,其中一束为高斯光束,代表激光雷达的探测回波;另外一束为均匀的平行光,用椭圆光源表示,其后插入一个漫射面,设置为朗伯散射模型,散射系数为0.5,经散射后的光代表太阳光等背景光。在轴棱锥后放置小孔光阑,通过设置一个环形面表示,其表面为吸光表面。两束光通过小孔光阑后到达探测面,探测面设置在轴棱锥的焦点处,表面为吸光表面,分析探测面上的接收到的光。

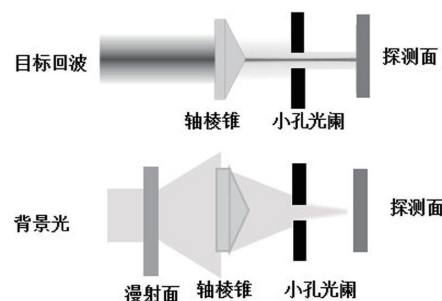


图3 轴棱锥和小孔光阑组成的光学空间滤波器对目标回波和背景光的作用

2 激光雷达中轴棱锥滤波模拟

设置功率相同的椭圆光源和高斯光源通过大气照射到目标表面,其中大气为散射介质,通过设置一个具有体散射性质的矩形体表示,该矩形体的体散射函数设为H-G函数, $g=0.5$ 。目标为漫反射目标,通过设置一个具有散射表面的矩形镜面表示,该矩形面的散射函数为朗伯散射,散射函数为0.5。值得注意的是,Zemax中模拟的漫反

射表面较为理想，实际应用中的目标物体表面更为粗糙。为节省计算资源，在背景光散射面和目标漫反射表面设置重点采样，只采样能够达到探测器的光线。探测面放置在轴棱锥的焦点处。模拟在激光雷达回波光路上放置轴棱锥和小孔光阑组成的滤波器后的光分布，如图4所示。仿真参数设置如表1所示。

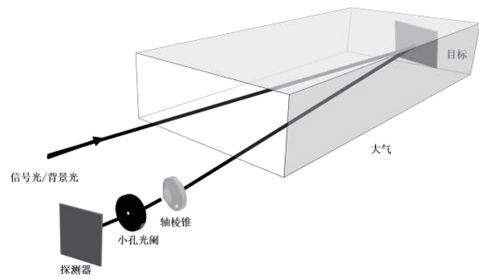


图4 激光雷达中模拟信号光和背景光的轴棱锥滤波光路示意图

表1 仿真参数设置

参数	值
高斯光源半径/mm	3
椭圆光源半径/mm	X、Y方向均为5
高斯光源功率/W	1
椭圆光源功率/W	1
光线追迹数目/ 10^9	1
轴棱锥口径/英寸	1
轴棱锥顶角/(°)	5
目标散射函数	0.5
大气散射介质g	0.5
大气散射介质透过率	0.9
探测面尺寸/mm×mm	10×10

3 仿真结果

设置体散射介质的衰减长度为0.2，在不设置小孔光阑时，探测面上目标回波和背景光分布如图5所示。从图中可以看出，背景光和目标回波经过轴棱锥后都被会聚，但是激光回波聚焦后的主光斑光强更集中，口径更小。

模拟使用不同口径的小孔光阑时，探测面上接收到的激光回波和背景光的光功率之比，如图6所示。可以看出，小孔光阑的口径越小，探测面上接收到的激光回波与背景光之间的比越大，即表明抑制的效果越明显。但是，当小孔光阑口径小到一定程度时，激光回波被遮挡，能量减少，影响探测效果。

模拟大气散射介质衰减程度不同时，探测面上接收到的激光回波和背景光的光功率之比，小孔光阑口径设为1mm，如图7所示。可以看出，

信号光经散射介质后，仍可被会聚。这是因为部分没有被散射的弹道光子和经历较少散射的蛇形光子保留其空间相干性，可以被轴棱锥转换。大气介质的衰减长度增加，轴棱锥滤波的方法仍然有效，但回波中弹道光子和蛇形光子减少，失去空间相干性而无法被转换的多次散射光子增加，该比值下降。当散射过于强烈时，本方法不再适用。此外，若大气中存在较强的湍流，导致目标回波无法保持高斯光性质，则需对回波先进行自适应波前矫正，使其恢复高斯光束状态，再进行滤波。

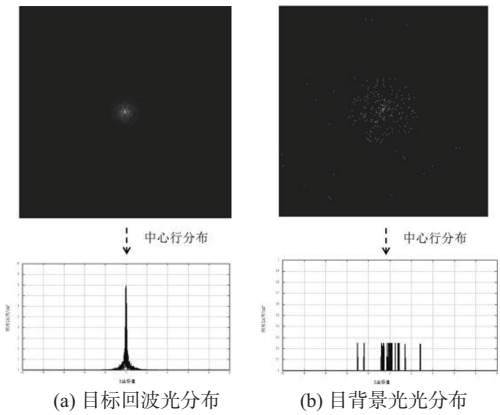


图5 探测面上目标回波和背景光的光分布

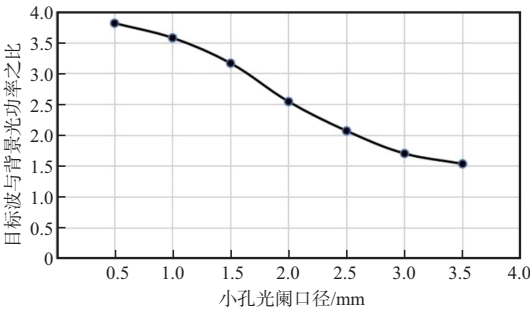


图6 小孔光阑口径不同时,探测面接收到的目标回波和背景光功率之比

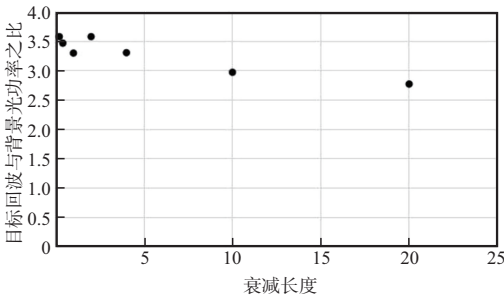


图7 大气散射介质衰减程度不同时,探测面接收到的目标回波和背景光功率之比

4 结 论

本文提出使用轴棱锥和小孔光阑组成的光学空间滤波器，用于抑制日间激光雷达探测中的太

阳背景光。当大气湍流较小、衰减不十分强烈时,借助轴棱锥可将目标回波转换成口径较小、能量集中贝塞尔高斯光束,而背景光被聚焦后无法生成贝塞尔高斯光束;再通过小孔光阑遮挡部分背景光,从而减少对背景光的接收。利用Zemax光学仿真软件模拟使用该光学空间滤波器后探测面上对激光回波光 and 背景光的接收,仿真结果表明,该方法可以抑制背景光;且小孔光阑的口径越小,抑制效果越好;入射光口径为3mm时,使用1mm孔径小孔光阑,对比度可提升3.5倍。但是需要考虑到小孔光阑对激光回波的遮挡。该空间光滤波器可以推广到水下、雾霾等场景中,实现对背景光、杂散光等的抑制。

参考文献:

- [1] Riemensberger J, Lukashchuk A, Karpov M, et al. Massively-parallel coherent laser ranging using a soliton microcombn[J]. Nature, 2020, 581(7807):164—170.
- [2] Wang D K, Xie H K, Thomas L, et al. A miniature LiDAR with a detached MEMS scanner for micro-robotics[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19):21941—21946.
- [3] 何志毅, 黄裕, 张雨益, 等. 空间光调制器扫描接收的距离选通成像激光雷达[J]. 光学学报, 2020, 40(12):1513028.
He Zhiyi, Huang Yu, Zhang Yuyi, et al. Range-gated imaging LiDAR by scanning reception of space light modulator[J]. Acta Optics Sinica, 2020, 40(12):1513028.
- [4] 杨健, 黄小兵, 李康, 等. 无人机激光雷达技术和倾斜摄影技术在地形测绘中的应用[J]. 北京测绘, 2024, 38(7):974—979.
Yang Jian, Huang Xiaobing, Li kang, et al. Application of UAV airborne LiDAR technology and oblique photogrammetry in topographic mapping[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2024, 38(7):974—979.
- [5] Welton E J, Campbell J R. Micropulse lidar signals: uncertainty analysis[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(12):2089—2094.
- [6] Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. CALIPSO lidar description and performance assessment[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(7):1214—1228.
- [7] Zhang C, Sun X J, Zhang R W, et al. Simulation and assessment of the solar background noise for spaceborne lidar[J]. Applied Optics, 2018, 57(31):9471—9479.
- [8] Zhang C L, Sun X J, Zhang R W, et al. Impact of solar background radiation on the accuracy of wind observations of spaceborne Doppler wind lidars based on their orbits and optical parameters[J]. Optics Express, 2019, 27(12):A936—A952.
- [9] Agishev R, Gross B, Moshary F, et al. Simple approach to predict APD/PMT lidar detector performance under sky background using dimensionless parametrization[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(8):779—796.
- [10] Gluckman J. Design of the processing chain for a High-altitude, airborne, single-photon lidar mapping instrument[C]//Laser Rdar Technology and Applications XXI. 2016, 983203.1—983203.9.
- [11] Zhou Z, Hua D, Wang Y, et al. Improvement of the signal to noise ratio of lidar echo signal based on wavelet De-noising technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8):961—966.
- [12] 翟宇, 韩绍坤, 李孟瑶, 等. 基于全波形采样的APD阵列激光雷达系统研究[J]. 光学技术, 2021, 47(2):149—154.
Zhai Yu, Han Shao Kun, Li Mengyao, et al. Research on APD array lidar system based on full-waveform sampling[J]. Optical Technique, 2021, 47(2):149—154.
- [13] 周玉叶, 袁宏武, 凤瑞, 等. 基于中值滤波和偏振调制的雾天偏振图像快速增强方法研究[J]. 光学技术, 2024, 50(1):106—111.
Zhou Yuye, Yuan Hongwu, Feng Rui, et al. Research on a fast enhancement method of polarization images in foggy weather based on median filter and polazization modulation[J]. Optical Technique, 2024, 50(1):106—111.
- [14] 王峰, 吴云智, 杨帆, 等. 偏振光成像探测技术及军事应用[M]. 国防工业出版社, 2021.
Wang Feng, Wu Yunzhi, Yang Fan, et al. Polarized light imaging detection technology and military application[M]. National Defence Industry Press, 2021.
- [15] Raghunath K, Ramesh K, Reddy S N. Fabry-perot interferometer as a solar background noise suppressor: application to daytime lidar[J]. Annals of Geophysics, 2012, 55(2):215—222.
- [16] Mckay J A. Single and tandem Fabry-perot etalons as solar background filters for lidar[J]. Applied Optics, 1999, 38(27):5851—5858.
- [17] Sun W, Hu Y, Macdonnell D G, et al. Technique to separate lidar signal and sunlight[J]. Optics Express, 2016, 24(12):12949—12954.
- [18] 李朝锋, 王振, 陈晨, 等. 基于涡旋光场水下激光雷达空间滤波技术研究[J]. 光学技术, 2023, 49(2):211—219.
Li Chaofeng, Wang Zhen, Chen Chen, et al. A spatial filtering technology in underwater lidar based on cortex light filed.[J]. Optical Technique, 2023, 49(2):211—219.