

# 浅析基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像

尹东彬<sup>1</sup>刘剑<sup>2</sup>

(1.广东国图勘测地理信息有限公司 广东广州市 510670; 2.广东省国土资源测绘院 广东广州 510500)

**摘要:** 基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像由于其垂直非扫描, 视野大, 灵敏度高和精度高的优势而最近得到开发和应用。光束整形器是线性阵列检测的关键组件。然而, 传统的光束整形方法几乎不能满足我们获得无偏和完整的反向散射强度数据的要求。所需的光束分布应大致为扁 U 形, 而不是高斯分布或均匀分布。因此, 我们提出了一种最佳的波束成形方法。通过在扩束器后面采用一对锥形透镜和一个柱面透镜, 将扩展的高斯激光器成形为线形光束, 其强度分布与所需的分布更加一致。为了更好地满足要求, 采用了离轴方法。用数学方法解释了最佳波束成形模块的设计, 并在此对模块性能进行了实验验证。实验结果表明, 最佳的光束整形方法可以有效地校正强度图像, 并提供比传统方法高 30% 的检测面积增益, 从而提高了基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像的成像质量。

**关键词:** 线状阵列扫描; 激光雷达; 快速三维成像

**Abstract:** Radar fast three-dimensional imaging based on linear array scanning has recently been developed and applied due to its vertical non-scanning, large field of view, high sensitivity and high precision. The beam shaper is a key component of linear array detection. However, the traditional beam shaping method can hardly satisfy our requirements for obtaining unbiased and complete backscatter intensity data. The desired beam distribution should be roughly flat U-shaped, rather than Gaussian or uniform. Therefore, we propose an optimal beamforming method. By adopting a pair of conical lenses and a cylindrical lens behind the beam expander, the expanded Gaussian laser is shaped into a linear beam whose intensity distribution is more consistent with the desired distribution. In order to better meet the requirements, the off-axis method is adopted. The design of the best beamforming module is explained mathematically, and the performance of the module is verified by experiments. The experimental results show that the best beam shaping method can effectively correct the intensity image and provide 30% higher detection area gain than the traditional method, thereby improving the imaging quality of the fast 3D imaging of the Radar based on linear array scanning.

**Key words:** linear array scanning; Radar; fast three-dimensional imaging

## 引言

激光雷达作为一种热门的遥感技术, 近年来一直在不断发展。目前, 激光雷达的机制主要包括: 点扫描激光雷达, 焦平面阵列激光雷达和线性阵列编码激光雷达。点扫描激光雷达是最早的激光雷达, 它具有各种缺陷。作为通过利用机械扫描装置逐点扫描对象来进行操作的扫描成像激光雷达, 它不能实现高帧频或精度, 特别是在移动目标的情况下。而且, 它具有较大的尺寸和较高的成本。相反, 焦平面阵列激光雷达最近得到了广泛的研究和应用。基于线状阵列扫描的激光雷达最近已成为距离测量和 3D 图像采集的重要方法。许多研究小组已经使用了一个雪崩光电二极管(GM-APD)作为在 3D 成像激光雷达系统的检测器, 由于其非常高的检测灵敏度和一个简单的读出集成电路。将 GM-APD 激光雷达放入 Jigsaw 程序中, 以检测和识别伪装且被树叶遮盖的目标。但是, 技术发展受到大型探测器设计的限制。因此, 已经提出了线性阵列编码激光雷达机构来解决该问题。在投影到物体上之前, 先对激光源进行扩展, 成形和解调。多路复用和编码技术的结合使激光雷达系统能够使用更少的检测器来实现非扫描成像, 大视野 (FOV) 和高横向分辨率。本文提出的工作就是基于这种类型的机制。

1、优化的基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像系统的原理

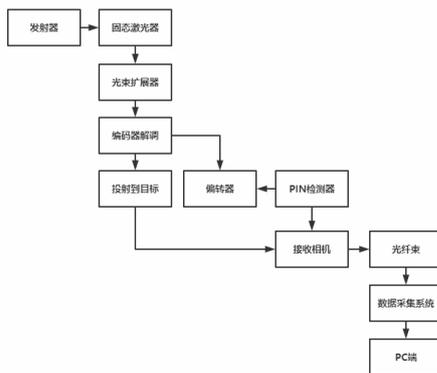
线性阵列编码激光雷达是一种新近开发的激光雷达系统, 其测量机制基于一种新颖的原理, 与传统的点扫描方法不同。激光脉冲首先扩展并形成线形光束, 线形光束然后在被投影到物体上之前由光学编码器进行编码, 最终垂直投影到目标上并水平推动扫描。接收器采用线性 APD 阵列来同步采集反向散射信号, 并采用多通道数据采集系统来数字记录像素的波形。通过降噪和解调方法分解涉及光振幅和时间的特征信息。最后获得强度和距离信息, 并将其用于重建目标的 3D 图像。然而, 先前的工作没有集中在光束质量上, 这导致了不准确和较差的图像质量。我们的工作旨在通过改善光束质量来校正强度数据。在已应用于激光扫描数据的传统强度校正方法中, 误差是由客观因素引起的, 例如球面损耗以及地形和大气影响。相反, 我们的线性阵列编码激光雷达引入的强度偏差和误差主要来自光束质量。因此, 我们重新设计了光束整形模块以提高激光束质量, 从而实现强度校正。

不同于接收器采用线性 APD 阵列来同步采集反向散射信号, 我们在接收器侧采用的复用方法允许每个检测器获得多像素信息。因此, 该系统能够实现有效的表面检测。该系统由一个发射器和一个接收器组成。发送器部分包括脉冲激光器, 扩束器, 光束整形器, 编码器和发送器摄像机, 而接

收器部分包括接收器摄像机, 光纤束, APD 阵列, 数据采集系统和 PC。工作原理如下。固态激光器产生具有一定频率和脉冲宽度的激光脉冲。然后, 通过光束扩展器将激光源扩展为大直径光束, 并通过光束整形器将其成形为线形光束。线形光束被编码器解调, 然后投射到目标。解调的激光束的一部分被偏转器转移, 并被 PIN 检测器捕获, 从而触发数据采集系统。在接收器端, 反向散射的回波信号被接收相机收集, 并通过光纤束传输到 APD 阵列。输出由数据采集系统进行数字记录, 并通过以太网端口传输到 PC。信号处理(包括降噪, 解调和分解)用于获得所有目标像素的强度和范围数据。如图 1 所示。

光束整形器由一对锥形透镜和一个圆柱透镜组成。相反, 传统方法是简单地使用圆柱透镜将大直径光束转换为线形光束。与传统方法相关的主要问题是成形的线性光束具有高斯特性。换句话说, 大部分能量都集中在中央区域, 这导致强度数据不均匀, 并在边缘区域造成严重的信息丢失。我们采用的最佳方法将有效解决此问题。

图 1 优化的基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像系统的工作原理



## 2、实验结果与讨论

基于前几节的理论推导和描述, 本节将包括三个部分, 包括基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像原型的设计, 最佳光束整形模块的质量验证以及使用该设置进行强度数据分析。

### 2.1、基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像原型的设计

结构由激光雷达系统由脉冲激光器, 扩束器, 光束整形器, 光学编码器, 发射器摄像机, 接收摄像机和 APD 阵列组成。操作流程如下。固态激光器用于产生 532nm 激光束, 脉冲重复频率 (PRF) 为 10kHz, 脉冲宽度为 10ns。扩束器和光束整形器共同用于产生线形光束。在这里, 系统中使用的光束整形器是采用上述光学方法设计的。编码器用于解调线形光束, 然后通过发射器摄像机将其投射到目标。在接收

器处, 接收摄像机收集反向散射的信号, 并将其传输到 APD 阵列。最后, 回声信号以 1GHz 的采样率进行数字记录, 并存储在 PC 中以进行后续信号处理。强度和范围数据集是通过分解观察信号中包含的所有像素的幅度和飞行时间信息获得的。

### 2.2、最佳光束整形模块的质量验证

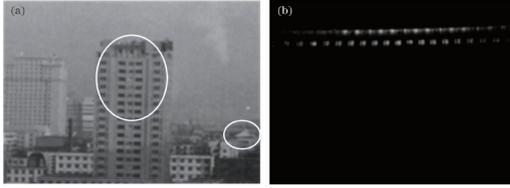
圆锥形透镜由 K9 玻璃制成, 可以透射 532nm 激光。圆锥透镜的尺寸为 30mm, 顶角为 160°。使用扩束器和光束整形器, 将直径为 24mm 的扩展光束转换为宽度为 0.4mm, 长度为 24mm 的线形光束。所产生的线形光束在中心具有更多的集中能量, 并且分布似乎近似为高斯分布。在此, 强度分布中出现的噪声是由背景光引起的。显然, 它几乎不能满足具有大视野的基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像的要求。最佳光束的分布非常符合所需的强度分布。因此, 采用最佳光束整形方法产生的线形光束非常适合于基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像, 以获得相对均匀的反向散射强度数据。

最后, 我们采用了原始的最佳方法来实施 3D 成像实验。比较了两种方法产生的恢复的图像质量, 特别是强度图像质量。实验系统是从约 500m 的高度空降运行的。考虑到激光雷达系统的 FOV 约为 6.87°, 地面上线形激光的近似大小约为 60m。最佳方法的强度图像比原始方法的强度图像更完整。其原因是, 最佳方法导致产生更宽的线形光束, 并且线形光束的频带内的大多数能量超过了 APD 检测器的 NEP。对两个恢复的 3D 图像之间的比较证明, 使用最佳波束成形方法的基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像系统可以实现强度数据的校正和检测区域的增益, 因此代表了 3D 成像的显著改进。

### 2.3、远距离目标三维重构

远距离探测目标分别为 706m 处的高层大楼和附近低层楼房, 条纹管激光雷达的接收视场为 5°, 发射视场为 5°, 探测用激光光束沿推扫方向上的发散角为 0.1°, 条纹管相机扫描全屏的时间为 600ns, 激光波长为 532nm, 单脉冲输出能量为 20mJ, 通过窗户对外场复杂场景进行一维扫描成像, 通过俯视和仰视方向推扫, 可获得由近及远的多目标复杂场景的条纹图像, 共计 435 幅, 条纹图像的大小为 640pixel × 480pixel, 图 1(a)、(b) 分别为实际场景照片和目标条纹图像。在远距离条纹图像中, 一个时间通道的像素数为 640, 帧数为 435 幅, 因而整个目标的方位-方位-距离矩阵为 640 × 435 阶, 与近距离目标三维重构处理方法相同, 取不同的抽样值, 可以获得与不同抽样值对应的抽样时间和相关系数。

图 1 远距离目标实物图和条纹像:(a)目标实物图;(b)目标条纹像



### 结束语

基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像中使用的传统光束整形方法会产生高斯分布的线形光束,该光束具有高度集中的中心能量,但边缘能量特别低。因此,出现的问题是所获得的强度数据不完整且不正确。为了校正强度数据,需要边缘能量高于中心能量的强度分布。因此,已经提出了最佳的光束整形方法,并且相应的模块设计有一对锥形透镜和一个柱面透镜。本文通过数学推导得出了最佳光束整形模块的光束强度分布。理论上的结果表明,通过最佳光束整形方法生成的线形光束与所需的分布是一致的。在实验部分,我们的方法产生的实际线形光束与理论模块显示出良好的一致性,并且明显优于传统方法产生的光束。然后将最佳光束整形器与基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像一起使用以完成成像实验。与传统系统的结果相比,利用强度数据和距离数据恢复了强度图像和深度图像。结果表明,采用最优波束成形方法的最优激光雷达系统可以实现强度数据的校正和检测区域的增益。因此,显着提高了成像质量。

本文介绍了基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成

像系统的工作原理,从中我们可以发现它相对于传统点扫描激光雷达的优势。基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像旨在实现表面检测而不是逐点检测,因此具有更高的成像效率。因此,基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像在未来具有广阔的前景。因此,基于这种系统的优化对于提高成像质量至关重要。这是本文提出的工作的目标和意义。

### 参考文献:

- [1]曹家军,许保瑜.基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像[J].科技风,2020,(13):128,137.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.202013108.
- [2]刘爱林,张敬金,李思宁,等.条纹管激光成像雷达目标三维重构快速算法[J].中国激光,2020,47(1):281-288. DOI:10.3788/CJL202047.0110004.
- [3]蔡银桥,童小华,舒嵘.基于线状阵列扫描的激光雷达快速三维成像[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):1062-1067.DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.022.
- [4]吴侯昊,崔子浩,高阳,等.无人机载激光扫描浅滩三维成像研究[J].激光与红外,2020,50(2):143-147.DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2020.02.003.
- [5]张茂云,丁红昌,唐晨,等.扫帚式激光三维扫描成像系统设计实验[J].制造业自动化,2019,41(11):132-135.