

《现代光学基础》调研报告



|  |  |
| --- | --- |
| 班 级： | 智能感知工程 |
| 姓 名： | 文世建 |
| 学 号： | 2023215307 |

2025年 9 月

**摘要**

光学在现代科技中的工程应用十分广泛, 但是对于我个人而言, 最熟悉的莫过于LiDAR-激光雷达了. 因为参加比赛的原因, 之前接触过SLAM技术, 而且使用的是视觉+激光雷达进行建图的方案, 所以对激光雷达的应用有所了解, 同时我也喜欢针对某项技术写总结性文档(但是我更喜欢MarkDown), 故最终写下这篇报告, 想要对激光雷达的技术进行一个粗略的总结. 另外我想要补充一点, 许多人认为纯视觉方案是L5自动驾驶的圭臬, 但是我想提出一点不同的看法, 这么多人信奉纯视觉方案的原因, 就是因为其最接近 ”人” 的驾驶逻辑, 但是真正的L5的定义是什么呢, 是 ”不需要驾驶员参与的驾驶, 可以取消方向盘和踏板”, 既然终极的L5没有 “人” 的参与, 那贴合 “人” 的逻辑是否还是优点呢? 其次, 真到了L5程度的车辆, 这时候还能称之为 “车” 吗? 我觉得这时候它更像是一个移动的机器人, 所以, 既然L5要 “超越人” 那么就得 “不止于人”, 就要使用超越人体感知范围的传感器. 激光雷达, 正是其一.

**一、基本原理**

激光雷达LiDAR的全称为Light Detection and Ranging (激光探测和测距), 又称光学雷达, 其工作原理是主动发射(反射)红外光束后再接收返回的光束, 通过发射与接收的时间差来探测物体距离. 这种通过发射波然后接收波随后根据时间推算距离的方法被称为 “飞行时间法”, 即 “ToF(Time of Flight)”.

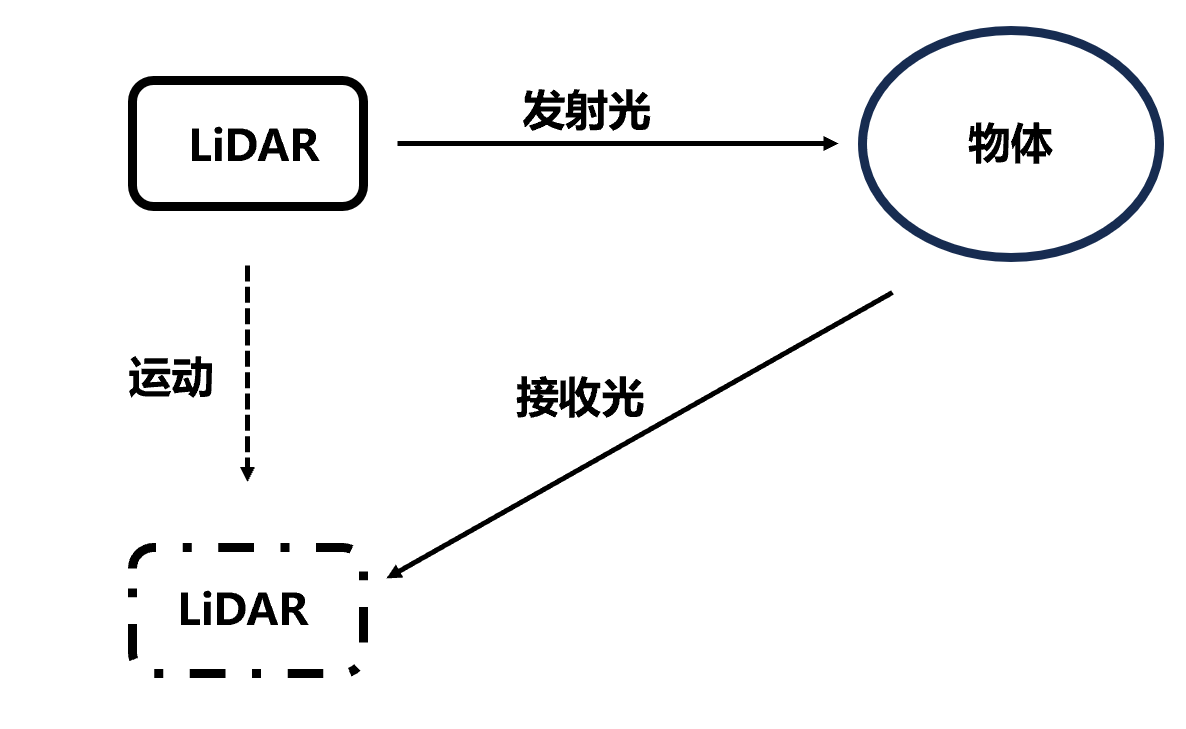


图1.1 ToF示意图

硬件组成方面, 一个LiDAR的关键部件按照信号流动链来看包括DSP/FPGA芯片, 激光驱动器, 激光器(发射激光), 发射光学镜头, 接收光学镜头, APD(雪崩光学二极管), TIA(跨阻放大器)和探测器. 这其中, 除了发射/接收光学镜头都是电子半导体器件, 随着半导体的发展, 半导体器件的集成度大幅提升的同时成本也在下降, 故LiDAR的成本主要集中在机械和光学结构上.

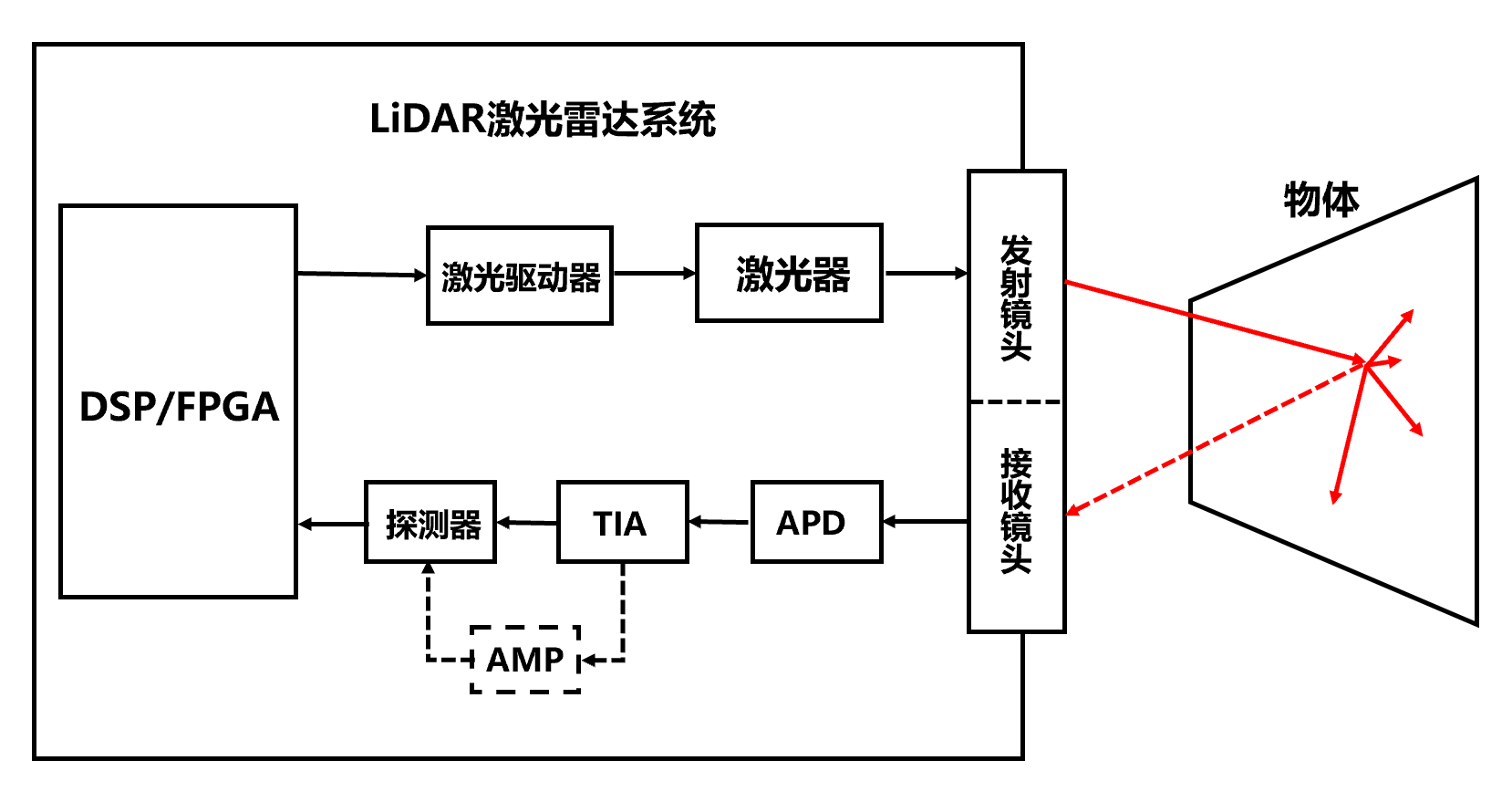


图1.2 LiDAR硬件组成示意图

对于发射链路, 首先由DSP/FPGA芯片控制驱动器, 其次驱动器进一步驱动激光器(因为激光器需要的电压电流一般芯片无法提供), 而激光器则主要由激光增益介质和谐振腔构成, 光束通过在谐振腔中不断反射从而不断被增益介质增强, 最后形成激光.

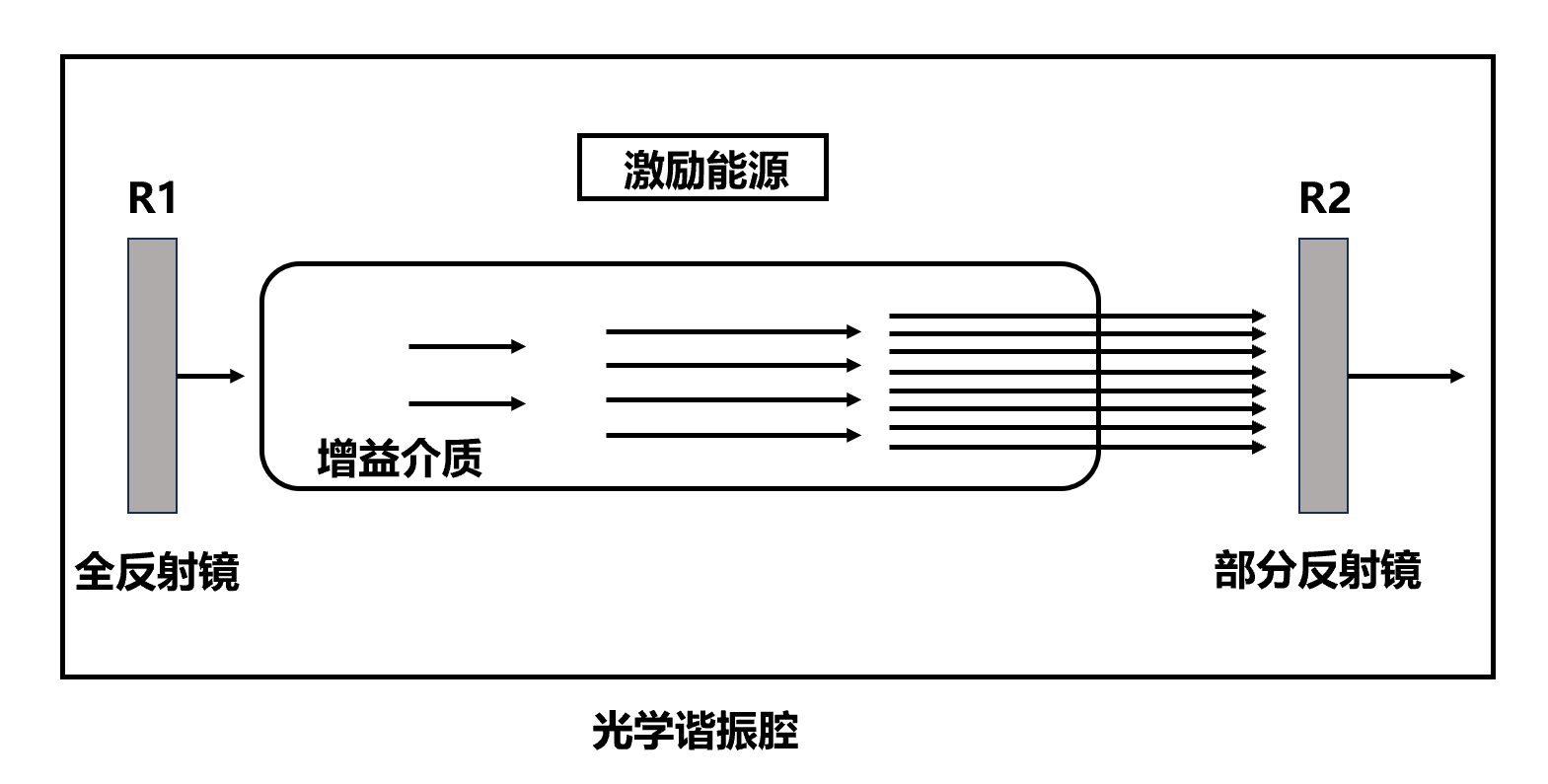


图1.3 常见光学谐振腔结构示意

而激光器其实也有不同的技术路线, 有固态激光器, 半导体激光器等, 但是其基本原理都是光束的多次谐振产生激光, 此处便不过多赘述其不同了.

对于接收链路, 从接收镜头进入的光线首先进入APD(雪崩光学二极管), 这是一个能将微弱光信号转换为电信号的器件, 有人可能就会问了(其实是我自己), 既然要实现光到电的转换, 为什么不使用CMOS或者CCD这种器件呢, 让我们回到最开始对LiDAR原理部分的介绍, 我们提到LiDAR是基于ToF进行距离计算的, 而光速是每秒30万公里, 也就是说, 如果要达到cm级别的分辨率, 那么LiDAR对单个点的测量响应时间就得达到ns 级别, 而CMOS/CCD最高只能到达ms级别, 无法胜任. 与之相对的, APD的响应时间可达ps级别, 同时CMOS/CCD专注的是二维图像的转换, 与LiDAR的单点光信息转换需求不匹配.

至于接收链路的TIA(跨阻放大器)则起的是将电流信号转换为电压信号并同时放大的作用, 而AMP(运算放大器)则是在信号极小时进行进一步放大的.

**二、LiDAR的不同典型实现结构**

有了基本原理, 接下来就是通过工程上的手段来实现, 现在工程应用上的LiDAR技术路线可以分为三大类: 机械实现, 半固态, 固态, 这是从激光的扫描方式来区分的. 得益于智能驾驶的发展, 半固态LiDAR在C端市场上已成主流.

机械实现, 顾名思义, 通过机械旋转的方式来进行扫描, 发射和接收模块被电机电动进行360度旋转。在竖直方向上排布多组激光线束，发射模块以一定频率发射激光线，通过不断旋转发射头实现动态扫描. 由于由机械驱动, 所以扫描范围极大, 同样受限于机械结构, 其体积无法缩小到消费者易接受的范围, 同时机械磨损使其使用寿命较短.

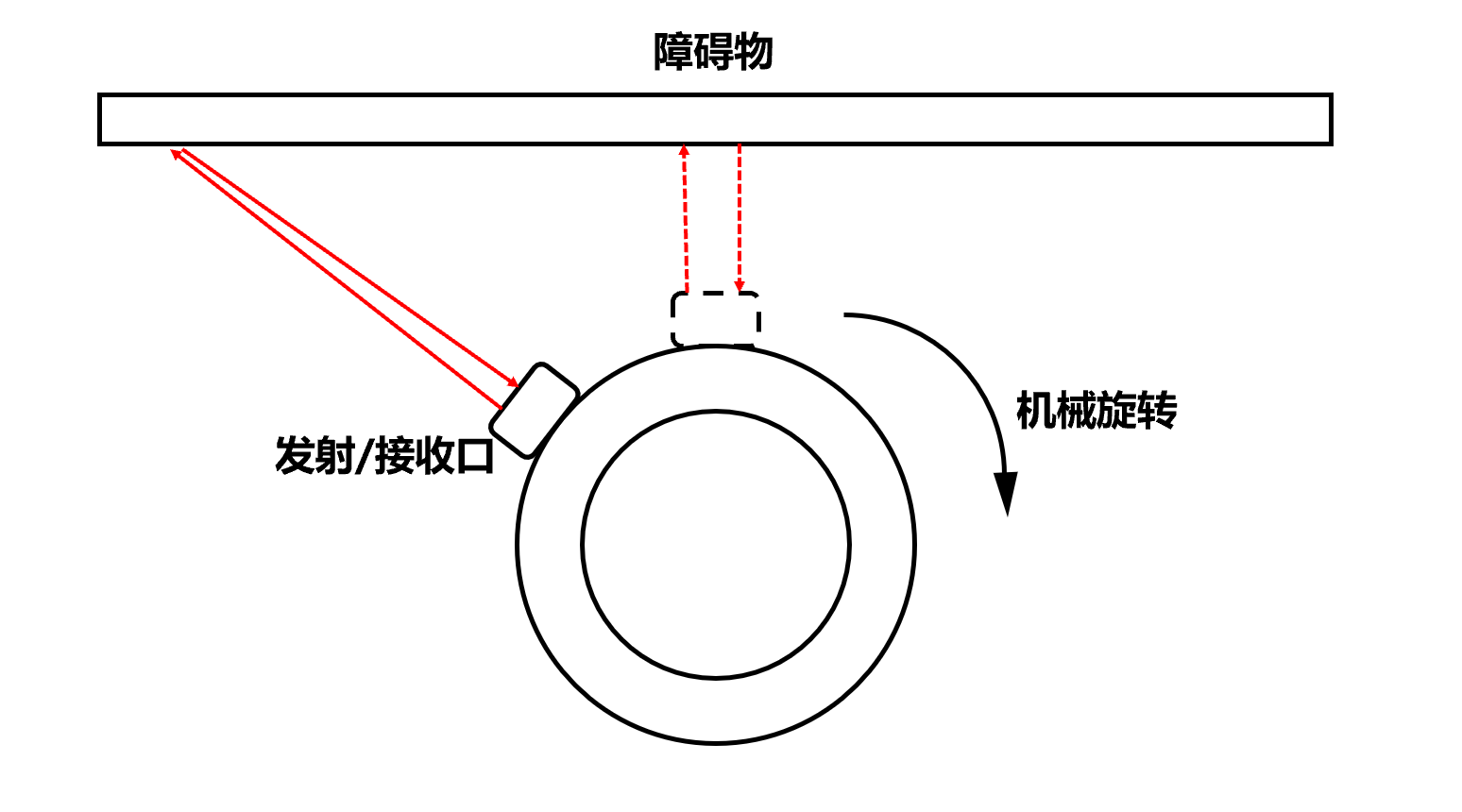


图2.1 机械实现方式LiDAR示意图

MEMS技术, 是半固态路线的核心, 在各式器件都在集成化的今天, MEMS(即微机电系统)已经成了高端电子产业不可或缺的技术了. 半固态LiDAR通过MEMS里的主控控制小型反射镜的偏转角度从而实现激光光束的偏转, 进而实现扫描. 由于半固态激光雷达是机械式和纯固态式的折中方案, 其在成本和稳定性之间找到了平衡点, 故其广受新能源车企喜爱.

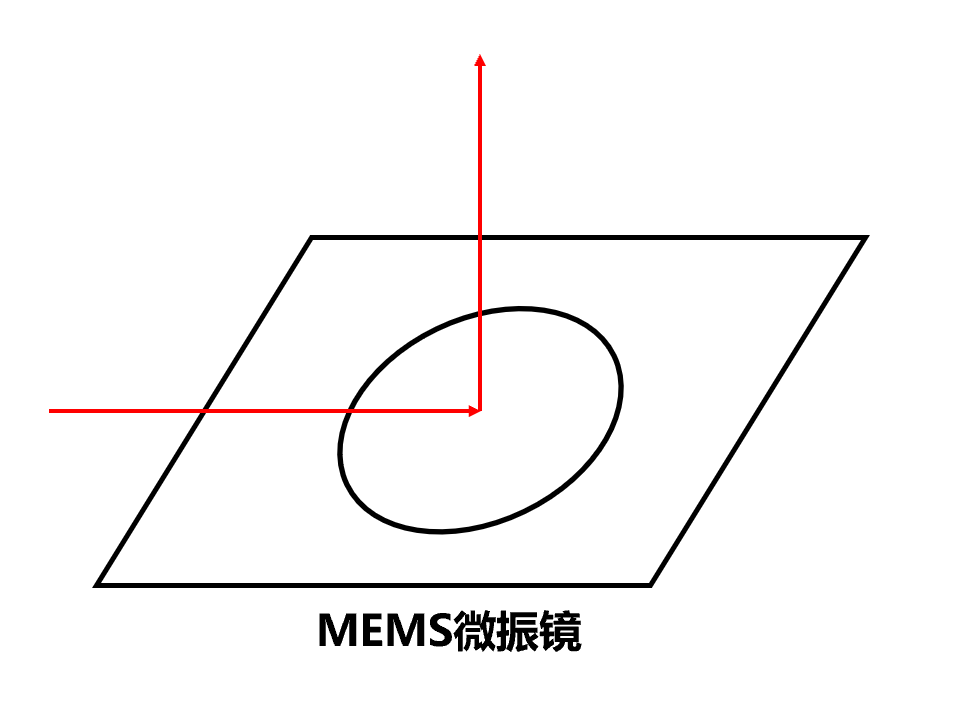


图2.2 MEMS微振镜示意图

固态LiDAR方案, 也被称为LiDAR技术的终极方案, 目前并未大规模商用. 其核心原理是 “光学相控阵”,(对,就是相控阵雷达那个相控阵). 光是电磁波, 而波与波之间会发生干涉现象, 通过控制相控阵平面阵列各个阵元的电流相位，利用相位差可以让不同的位置的波源会产生干涉, 从而指向特定的方向，往复控制便得以实现扫描效果(相控阵雷达也是这个原理). 可以发现, 这种扫描方法是纯控制实现的, 没有任何需要活动的机械结构, 因此耐久度上表现出众, 同时体积可以做得很小, 是最适合集成的方案.

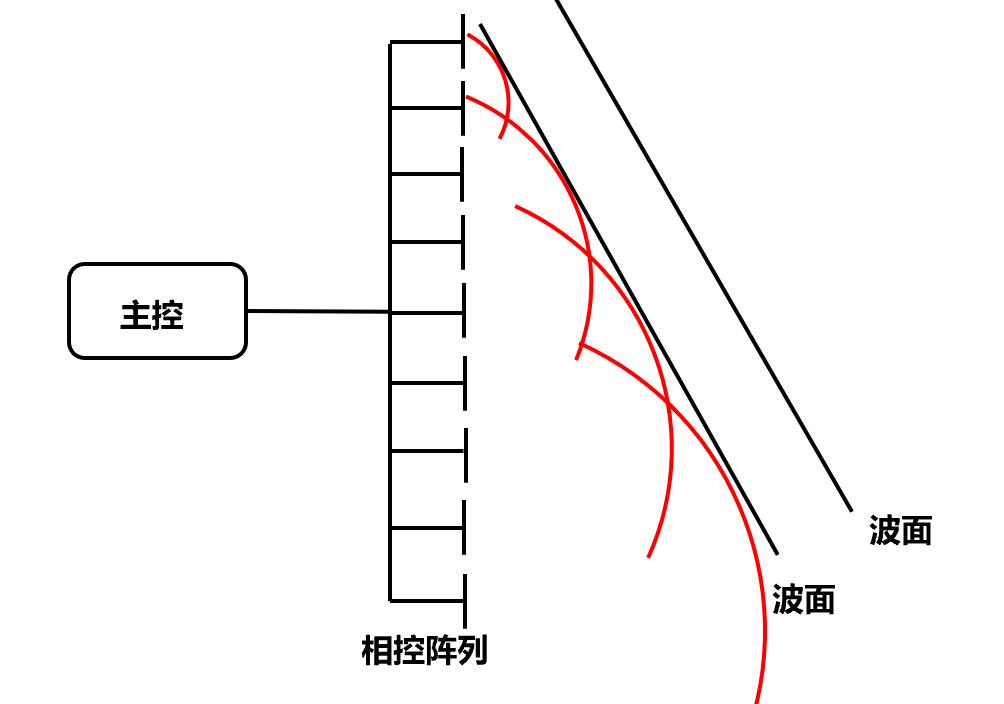


图2.3 固态LiDAR相控阵列示意图

这三种LiDAR方案, 各有其优劣, 但是可以预见的是, 包括LiDAR在内的传感器, 都在向高度集成化, 高度稳定性的方向发展.

**三、关键技术问题**

LiDAR激光雷达技术发展至今, 有一些得到或者仍未得到解决的主要关键技术问题, 从这些关键问题中, 或许我们能够探寻到激光雷达的命脉所在.

首先是激光器功率与安全的平衡问题, 前面提到LiDAR使用的是红外光, 但是使用905nm的红外光在功率过大时会对人眼造成伤害, 所以现在使用905nm红外光的LiDAR都被严格限制功率, 这导致了探测距离受限, 近年提出了1550nm红外光的解决方案, 可以使用更高的功率了, 但是成本显著提升.

其次是探测器链路的技术瓶颈, 因为LiDAR依赖于光, 而我们的环境充满了噪声光源, 同时远距离反射光功率极低(可能只有nW级), 这使得对接收信号中有效信息的提取难上加难, 需要对信噪比进行优化.

最后是成本和性能的平衡问题, 这是一项技术落地面向市场前必须要解决的问题, 虽然有人预估在固态LiDAR技术成熟后, LiDAR的成本会大幅下降, 但是仍在实验室研发的技术并不能让消费者买单.

总之, LiDAR激光雷达的发展道路还很长, 未来, 随着智能驾驶, 机器人, 无人机等对感知强需求的工业产品进一步发展, LiDAR的需求也会大幅提升, 这将促使相关研发团队继续优化攻关LiDAR的技术难题.

**四、总结**

本篇报告由本人结合网络材料, 书籍, 文献等的LiDAR技术相关内容后总结得出, 如有谬误, 恳请斧正.

**五、参考文献**

[1] Velodyne Inc. The Velodyne HDL-64E: A High Definition LiDAR for 3-D Applications. Technical Report, 2007.

[2] Seok, T. J., Kwon, K., Henriksson, J., Luo, J., & Wu, M. C. Large-scale silicon photonic switches with movable directional couplers. Nature Photonics, 2013, 7(4): 346-352.

[3] Yole Développement. MEMS Mirrors for LiDAR: A Review. Market & Technology Report, 2020.

[4] Li, Y., & Ibanez-Guzman, J. Lidar for autonomous driving: The principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 50-61.

[5] Royo, S., & Ballesta-Garcia, M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4093.

[6] Hecht, J. Lidar for self-driving cars. Optics and Photonics News, 2018, 29(1): 26-33.

[7] Sun, X., Zhang, L., Zhang, Q., & Zhang, W. Si photonics for practical LiDAR solutions. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4225.

[8] Welford, D. A progress review on solid‐state LiDAR and nanophotonics‐based LiDAR sensors. Advanced Optical Technologies, 2022, 11(3-4): 103-125.

[9] Rogers, C., Piggott, A. Y., Thomson, D. J., Wiser, R. F., Opris, I. E., Fortune, S. A., ... & Reed, G. T. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform. Nature, 2021, 590(7845): 256-261.