光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023081003

激光雷达接收机中时刻鉴别模块的研究和设计

赖慧敏，刘　杰*，刘红海，张建宏

（湖州师范学院 信息工程学院，浙江 湖州 313000）

摘　要： 时刻鉴别在激光雷达接收机电路中决定着系统整体的测量精度。考虑到传统的前沿时刻鉴别法测量精度不高，而恒比定时法又存在大量的器件损耗，提出一种新的时刻鉴别法。首先采用高、低两个增益并联的电压放大器，获得两个具有不同增益的脉冲电压信号；再通过四个比较器获得两个脉冲电压信号的前后沿；最后通过几何平均算法获得回波脉冲的形心，从而确定回波到来的时刻。Matlab仿真结果表明，所提时刻鉴别法的鉴别精度优于传统的时刻鉴别法。通过Multisim对时刻鉴别模块进行仿真，结果显示电压放大器和比较器的输出波形均符合预期效果。最后把设计的时刻鉴别模块应用于接收机中进行实验，结果表明该模块可达到三维成像激光雷达接收机电路的系统精度要求，有较好的三维成像效果。

关键词： 激光雷达；接收机；时刻鉴别法；回波脉冲；形心

中图分类号： TN958.98　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0303－05

Design of Time Discrimination Module in LiDAR Receiver

LAI Huimin，LIU Jie，LIU Honghai，ZHANG Jianhong

（College of Information Engineering，Huzhou University，Huzhou 313000，CHN）

Abstract： The time-discrimination method determines the measurement accuracy of an entire system in the receiver circuit of a LiDAR（LightLaser Detection and Ranging）. As the accuracy of the traditional leading-edge time discrimination method is not high and the constant-ratio timing method presents considerable device loss，a new time discrimination method is proposed. First，two voltage amplifiers with high and low gains are used in parallel to obtain two pulse-voltage signals with different gains. Subsequently，The front and back edges of the two pulse voltage signals are obtained using the four comparators. Finally，the centroid of the echo pulse is obtained using a geometric averaging algorithm，to determine the arrival time of the echo. MATLAB simulations showed that the accuracy of the proposed method is better than those of traditional methods. The output waveform of the voltage amplifier and comparator conformed to the expected results obtained by simulating the time-discrimination module by employing Multisim. Finally，the time application of the discrimination module designed by the proposed time discrimination method to the receiver revealed that the module satisfied the system accuracy requirements of the 3D imaging LiDAR receiver circuit in experiments，demonstrating a good 3D imaging effect.

Key words： lightlaser detection and ranging；receiver；time discrimination method；echo pulse；centroid

收稿日期：2023－08－10.

基金项目：湖州市公益重点项目(2019GZ10)；浙江省重点实验室项目(2020E10017).

* **通信作者：**刘　杰

0 引言

激光雷达(LightLaser Detection and Ranging, LiDAR)是激光探测及测距系统的简称,通过对激光返回信号进行接收和处理,实现对目标进行表征[1],可广泛应用于距离测量、方位探测、高度测量和三维成像等领域[2-4],比如在军事方面可对飞机、导弹等目标实现跟踪、探测和识别[5],在民用方面可应用于汽车自动驾驶[6],从而形成机载、弹载、车载等装置。随着集成电路的发展和激光器发射功率的提高,激光雷达正向着测量距离更远、测量精度更高、测量体积更小的方向发展。

有研究者提出在激光雷达接收机电路中设计收集回波信号强度的峰值保持电路[7],也有研究者提出基于三维静态单一探测器成像的激光检测电路和测距雷达传感器[8]。在这些接收机电路中,时刻鉴别模块采用前沿时刻鉴别法,利用一个固定阈值的比较器获得回波信号的前沿时刻来实现时刻鉴别功能。徐彬等[9]提出了一种将回波脉冲信号进行差分电平平移后送入高速比较器的时刻鉴别方法。通过验证,该设计有效改善了前沿时刻鉴别法产生的行走误差,测距精度相比于其他方法有所提升。郭守罡等[10]提出一种具有自适应增益控制的恒比定时时刻鉴别法,其鉴别误差在 0.42 ns 以内。该方法的时刻鉴别精度基本满足三维成像激光雷达对时刻鉴别精度的要求,但器件损耗较大。吴钰[11]提出一种双通道时刻鉴别电路,其鉴别误差在 0.6 ns 以内。相比于其他时刻鉴别法,该方法的鉴别精度偏低,无法满足三维成像激光雷达对时刻鉴别精度的要求。

与上述文献相比,本文提出的时刻鉴别法的测时误差在 0.2 ns 以内,测时精度相对较高,器件损耗相对较小。利用该方法设计的时刻鉴别电路能够提升三维成像激光雷达整体的测量精度,且稳定性较高。

1 时刻鉴别模块中的时刻鉴别法

1.1 所提时刻鉴别法

本文所提时刻鉴别法利用波形的前沿、后沿和高低增益来确定四个回波时刻,再利用这四个时刻值找到主波和回波的形心对应的时刻,即为起止时刻。图 1 所示为该方法的原理示意图。

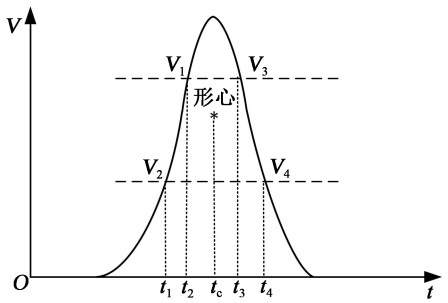


图 1 所提时刻鉴别法原理示意图

由图 1 可知,V_1 为高增益波形前沿对应的脉冲幅值,对应时刻记为 t_2;V_2 为低增益波形前沿对应的脉冲幅值,对应时刻记为 t_1,V_3 为高增益波形后沿对应的脉冲幅值,对应时刻记为 t_3;V_4 为低增益波形后沿对应的脉冲幅值,对应时刻记为 t_4。t_c 为形心,可以根据公式(1)计算得出:

$$t_c = \frac{\sum(t_1, t_2, t_3, t_4)}{4} \tag{1}$$

传统的前沿时刻鉴别法、恒比定时法以及本文所提的时刻鉴别法都有其对应的信号到来时刻,使用 Matlab 对这三种算法进行仿真,得到的发射脉冲和回波脉冲的脉冲形心如图 2 所示。

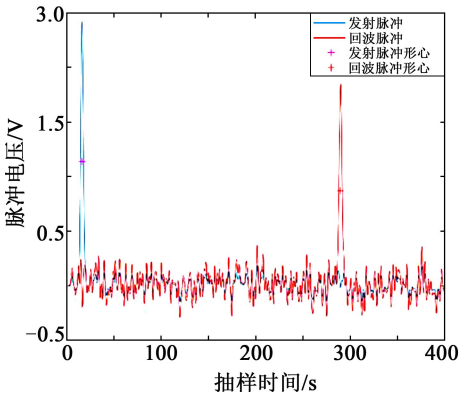


图 2 所提时刻鉴别法仿真图

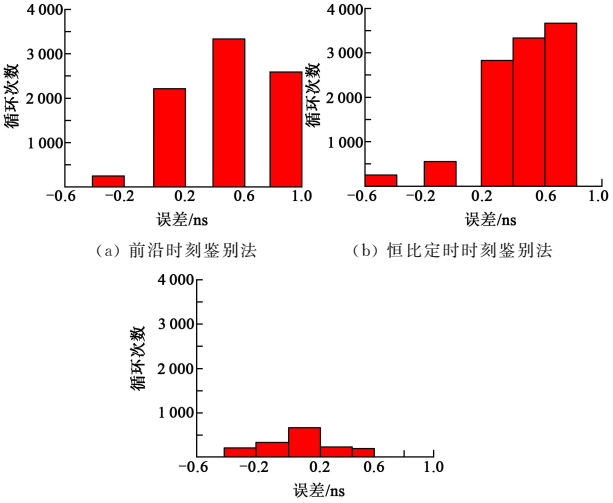
由图 2 的仿真图可以看出所提时刻鉴别法计算出的脉冲发射时刻和回波脉冲时刻不受脉冲幅值和形状的影响。所提时刻鉴别法是一种高低阈值、波形前后沿多时刻鉴别法,仅使用常规的放大器和比较器器件即可实现。

1.2 各种时刻鉴别法的误差比较

本文通过 Matlab 对前沿时刻鉴别法、恒比定时法以及本文所提时刻鉴别法进行仿真,并对仿真结果进行分析,得到了三种时刻鉴别法鉴别误差的分布直方图,如图 3 所示。

图 3 是三种时刻鉴别法在信噪比为 10 dB、脉宽

为 2 ns 情况下的仿真结果。其中横坐标表示信号到来时刻与理论值的差值，纵坐标表示算法的循环次数。由图 3 可以看出前沿时刻鉴别法的误差主要集中在 1 ns 以内，且分布不均匀；恒比定时时刻鉴别法的误差主要集中在 0.8 ns 以内，分布相对也不均匀；而本文所提时刻鉴别法的误差则主要集中在 0.2 ns 以内。前两者误差直方图分布较离散，具有不稳定性，而所提时刻鉴别法的误差最小，误差分布直方图较均匀，表明稳定性较好。



（a）前沿时刻鉴别法　（b）恒比定时时刻鉴别法

（c）所提时刻鉴别法

图 3　几种时刻鉴别法误差统计直方图

1.3　时刻鉴别模块的设计原理

图 4 为所提时刻鉴别模块的硬件设计原理框图。该方法的硬件结构由两个具有高低增益的电压放大器和四个比较器构成。其工作原理为：雪崩光电二极管（APD）探测到的回波信号利用前端电路进行光电转换、选通、跨阻放大、差分转单端处理后，形成初步放大信号，然后又分为两路进入时刻鉴别模块，其中一路进入可变增益放大器 AD8367 进行高增益放大，另一路进入可变增益放大器 AD8367 进行低增益处理。获得的高增益回波信号由两个比较器 AD8465 以固定阈值的方式获得波形的前、后沿时刻。同时，获得的低增益回波信号同样由两个比较器 AD8465 以固定阈值的方式获得波形的前、后沿时刻。后端电路采用 FPGA 设计。上述获得的四个时刻由 FPGA 计算后得到回波最终的到达时刻，发出 Stop 信号，FPGA 停止计时。

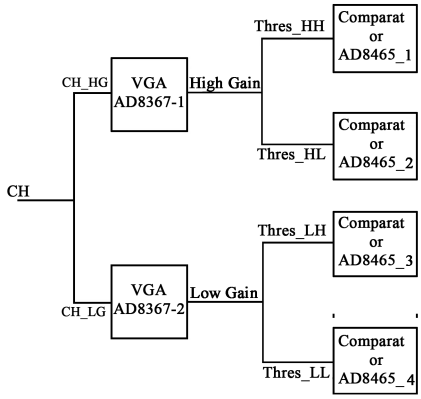


图 4　时刻鉴别模块结构图

本文利用 AD8367 芯片设计的高低增益放大器的原理图如图 5 所示。

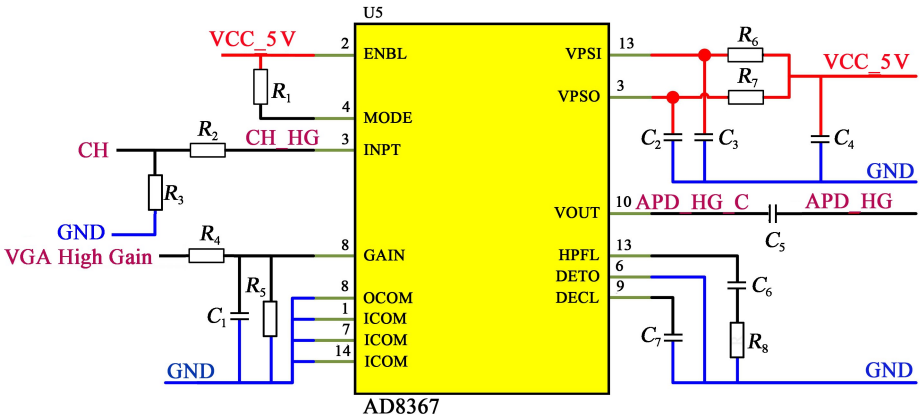


图 5　高增益调节电路原理图

图 5 中，GAIN 引脚为高增益输入端口，FPGA 可依据反射物体的表面特征等因素通过数模转换来动态调整该电压放大器的幅值。经过选通模块跨阻放大后的回波信号仅为 1.2 mV，无法满足后续电路对输入信号的要求，因此时刻鉴别模块的高增益调节和低增益调节需要将差分转单端模块输出的信号进一步放大。使用 Multisim 对该模块进行仿真时，将增益设置为 40，得到仿真结果如图 6 所示。

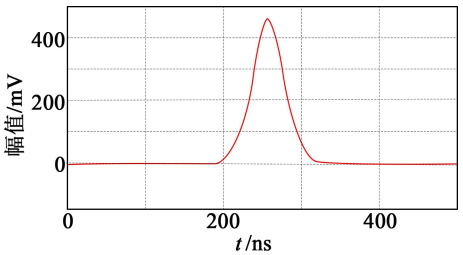


图 6 高增益放大电路仿真结果

从图 6 可以看出，仿真结果与分析结果相符，验证了该模块的可行性，并且可以达到整个激光雷达接收系统对信号的要求。低增益调节选用的芯片和高增益相同，并且原理图也是相同的，这里不再赘述，但低增益调节初始增益设为 20。

经过高低增益调节后，需要获得信号的前后沿对应幅值，而比较器可以完成这个功能。这里用到的四个比较器均为 AD8465。该芯片属于快速比较器，满足高带宽、低噪声、低功耗等性能要求，适用于高速激光雷达。因此时刻鉴别模块就是通过设定四个比较器的阈值，分别获取高增益回波波形的前沿和后沿、低增益回波波形的前沿和后沿所对应的时刻值，最后计算获得最终时刻鉴别值，并作为产生停止信号(stop)。

本文利用 AD8465 比较器设计的电路原理图如图 7 所示。

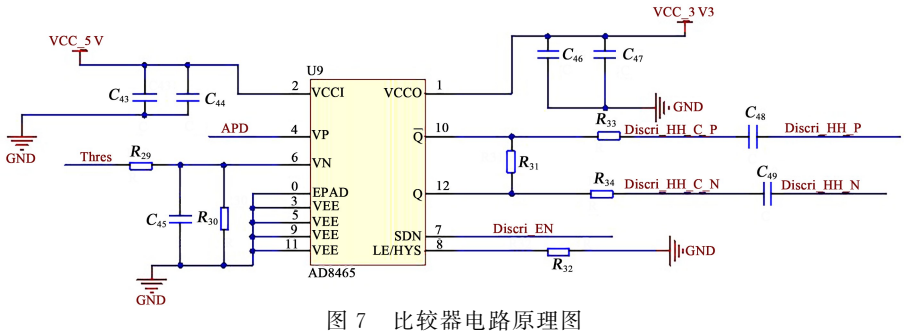


图 7 比较器电路原理图

在实际的电路设计中，图 7 中的芯片采用 5 V 供电，其中 C_{43}，C_{44}，C_{45}，C_{46} 和 C_{47} 均属于旁路电容，C_{45} 和 R_{30} 构成滤波器。比较器阈值的设置需要恰当，既不能设置过高，也不能设置过低。如果阈值过高，会导致有效探测信号丢失，从而导致探测概率较低。反之，如果阈值过低，探测器将会检测到许多噪声信号，从而降低系统的准确性。

对于高增益电压放大后的信号来说，比较器选取的阈值电压为 120 mV，选取的高电平为 4 V，低电平为 0 V。当有效信号来临且超过阈值电压时，比较器输出设定的高电平值，否则比较器输出低电平。如图 8 所示，当有效信号低于阈值电压时比较器输出 0 V，而当有效信号高于阈值电压时比较器输出 4 V。

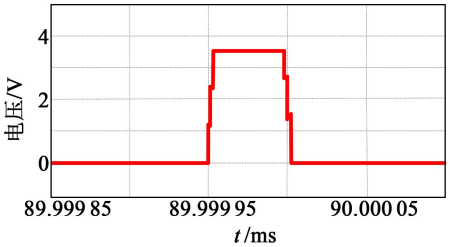


图 8 电压比较器输出仿真结果

2 接收机电路

如图 9 所示是采用本文所提时刻鉴别法设计的时刻鉴别模块构成的接收机电路框图。整个接收机电路由 APD 探测器组、选通模块、差分转单端模块、增益调节模块、时刻鉴别模块、峰值检测模块、A/D 转换模块、电平转换模块、D/A 转换模块，以及 FPGA 模块组成。在不同反射率下对前沿时刻鉴别法、恒比定时时刻鉴别法，以及本文所提时刻鉴别法的接收机电路板(分别记为 A，B，C)进行不同距离的测量，结果见表 1。由表 1 可知，前沿时刻鉴别法的测距误差在 14 cm 左右，恒比定时时刻鉴别法的测距误差在 8cm 左右，所提时刻鉴别法的测距误差在 2 cm 左右。因此，通过实验表明所提的波形前后沿时刻鉴别法的测距误差最小，即测距精度最高。

表 1 三种时刻鉴别方法在不同反射率下的测距结果

探测距	A		B		C	
离/m	92%	5%	92%	5%	92%	5%
1	1	1.09	1	1.03	1	1.01
2	2	2.11	2	2.05	2	2.01
3	3	3.13	3	3.07	3	3.02
5	5	5.17	5	5.11	5	5.02
6	6	6.19	6	6.13	6	6.03

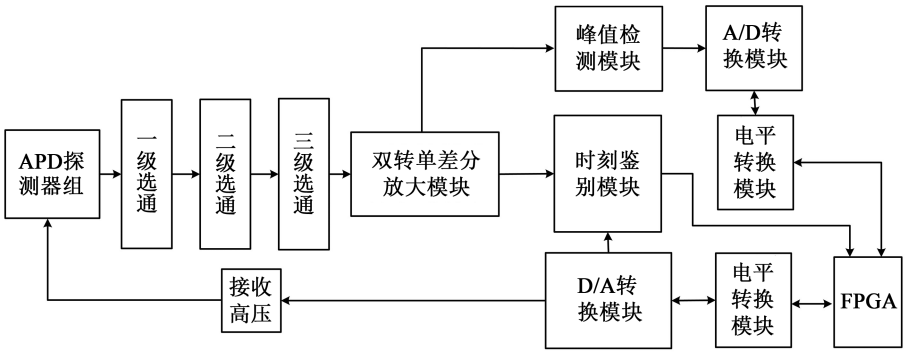


图 9　接收机硬件电路结构框图

3　结论

本文提出了一种新的时刻鉴别法，该方法采用两个具有高低增益的放大器和四个固定阈值的比较器获得脉冲形心，确定脉冲的起止时刻，从而可以更加精确地获取目标的距离。利用仿真软件对所提时刻鉴别法进行了仿真验证，结果显示该方案具有更高的测量精度。进一步的实验验证，证实了电路的有效性和可行性。

参考文献：

[1] 王永达，张云刚，胡　睿，等. 基于激光测距原理的锻件倾斜度测量[J]. 计量学报，2022，43(8)：1001-1007.
Wang Yongda，Zhang Yungang，Hu Rui，et al. An inclination measurement of forgings based on laser ranging principle[J]. ACTA Metrological Sinica，2022，43(8)：1001-1007.

[2] 王　皓，罗　沛，李小路. 近程动态范围激光雷达测距系统设计及误差分析[J]. 北京航空航天大学学报，2020，46(2)：422-429.
Wang Hao，Luo Pei，Li Xiaolu. Design of LiDAR ranging system for short-distance dynamic range and error analysis[J]. J. of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2020，46(2)：422-429.

[3] 刘　博，于　洋，姜　朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程，2019，46(7)：15-27.
Liu Bo，Yu Yang，Jiang Shuo. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging[J]. Opto-electronic Engineering，2019，46(7)：15-27.

[4] 王滨川，郑焕东，石　峰. 基于国产三代微光 ICCD 探测器的三维激光成像雷达[J]. 激光与红外，2022，52(9)：1348-1353.
Wang Binchuan，Zheng Huandong，Shi Feng. Non scanning laser imaging radar based on domestic three-generation image intensifier charge-coupled device[J]. Laser & Infrared，2022，52(9)：1348-1353.

[5] 樊博璇，陈桂明，常　亮，等. 激光雷达技术在军事领域应用现状及发展趋势[J]. 航天制造技术，2021(3)：66-72.
Fan Boxuan，Chen Guiming，Chang Liang，et al. Application status and development trend of lidar technology in military field[J]. Aerospace Manufacturing Technol.，2021(3)：66-72.

[6] 吴　琼，时　利，谢欣燕，等. 基于视觉标记板的自动驾驶车辆激光雷达与相机在线标定研究[J]. 汽车技术，2020(4)：40-44.
Wu Qiong，Shi Li，Xie Xinyan，et al. An on-line calibration method between laser and camera in autonomous driving vehicle based on visual marker board[J]. Automobile Technol.，2020(4)：40-44.

[7] Hong C，Kim S H，Kim J H，et al. A linear-mode LiDAR sensor using a multi-channel CMOS transimpedance amplifier array[J]. IEEE Sensors J.，2018，18(17)：7032-7040.

[8] Kim H J，Lee E G，Choi H W，et al. High spatial resolution three-dimensional imaging static unitary detector-based laser detection and ranging sensor[J]. Appl. Sciences，2019，9(10)：2145.

[9] 徐　彬，朱天凤，王　丽. 一种激光雷达时刻鉴别电路设计[J]. 应用激光，2022，42(5)：82-87.
Xu Bin，Zhu Tianfeng，Wang Li. Design of time discrimination circuit for lidar[J]. Appl. Laser，2022，42(5)：82-87.

[10] 郭守罡，李　松. 大动态范围激光雷达时刻鉴别电路设计[J]. 半导体光电，2021，42(1)：144-150.
Guo Shougang，Li Song. Design of time discrimination circuit for large dynamic range lidar [J]. Semiconductor Optoelectronics，2021，42(1)：144-150.

[11] 吴　钰. 用于汽车主动防撞的激光雷达研究[D]. Nanjing：南京理工大学，2018.
Wu Yu. Research on lidar for automobile active collision avoidance[D]. Nanjing：Nanjing University of Science & Technology，2018.

作者简介：

赖慧敏(1996—)，女，河南省正阳县人，硕士生，研究方向为激光雷达设计和信息处理；

刘　杰(1970—)，男，安徽省泗县人，博士，教授，硕士生导师，研究方向为计算机体系结构、IC 测试和电路设计。