光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.026

大动态范围激光雷达时刻鉴别电路设计

郭守罡，李　松*

（武汉大学 电子信息学院，武汉 430079）

摘　要： 在激光雷达系统中，受限于被测目标距离及反射特性的变化，回波信号的峰值动态范围大，导致由恒比定时鉴别电路确定的回波到达时刻波动较大，产生的行走误差影响了系统的测距精度和测量范围。设计了一种带自适应增益控制的恒比定时鉴别电路，基于回波信号水平快速自动调节放大电路的增益，可适应较大动态范围下的目标测量。实验结果表明，采用自动增益与恒比鉴别电路相结合的方法设计的激光雷达时刻鉴别电路，可以基于回波信号水平在 25 ns 的时间范围内实现放大电路增益的自适应调节；当输入信号上升时间为 3 ns、电压动态范围为 29 dB 时，利用增益的自动控制可以将回波信号的动态范围降低至 9 dB，将回波时刻鉴别误差控制在 0.42 ns 内，有效减小了测距系统的行走误差。

关键词： 激光雷达；恒比定时鉴别；动态范围；测距精度；自动增益

中图分类号： TN958.98　**文章编号：** 1001－5868(2021)01－0144－07

Design of Time Discrimination Circuit for Large Dynamic Range LiDAR

GUO Shougang，LI Song

（School of Electronic Information，Wuhan University，Wuhan 430079，CHN）

Abstract： In the LiDAR system，due to the variation of the target distance and reflection characteristics，the peak value of the echo signal fluctuates in a relatively large range，which leads to a big fluctuation of the arrival time of the echo determined by the constant ratio timing discriminator circuit，and the resulting walking error affects the ranging accuracy and measurement range of the system. In this paper，a constant fraction discriminator with adaptive gain control is designed，thus the gain of the amplifier circuit can be adjusted quickly and automatically based on the level of the echo signal，which can adapt to the target measurement in a large dynamic range. The results illustrate that the designed circuit adopting automatic gain and constant fraction discriminator component is able to automatically configure and amplify the circuit gain within 25 ns. When increasing duration of input signal to 3 ns and the voltage dynamic range is stabilized around 29 dB，the automatic control system adopted automatic gain design can effectively reduce the fluctuation range of dynamic error and the discrimination error of echo signal to 9 dB and 0.42 ns respectively，reducing the walking error significantly.

Key words： LiDAR；constant-fraction discrimination；dynamic range；ranging precision；automatic gain

0　引言

激光雷达技术主要用于主动式遥感领域，具有精度高、抗干扰能力强、探测范围广等优势[1]。随着激光技术的不断发展，激光雷达往往工作在较大的距离区间，导致回波动态范围较大，而一般的激光测距机只能给出指定范围内的测距精度。为了使激光

收稿日期：2020－11－20.

*通信作者：李　松　　E-mail：ls@whu.edu.cn

雷达在整个工作区间保持较为稳定的测距精度，对激光雷达的硬件技术提出了更高的要求，本文对激光雷达中的脉冲激光测距系统进行研究。脉冲激光测距系统利用激光器发射一束窄脉冲，经过目标反射后返回接收机，计算激光往返时间，结合在空气中的光速，可以计算得到被测目标的距离。

准确确定激光的渡越时间是保证激光雷达系统测距精度的关键[2-3]，系统中的计时模块主要用于对脉冲发射时刻和回波到达时刻的准确提取，以及两者间时间差的计算。计时模块的工作过程一般为：以固定阈值的比较器作为回波信号到达的判别依据，当回波信号达到某一阈值时比较器发生翻转。但是由于探测距离的不同和目标反射特性的改变，回波信号的幅值水平会发生较大变化，采用固定阈值来判断回波的到达时刻会产生误差，这种由于回波信号水平不同而产生的到达时刻的漂移被称为行走误差[4-7]。恒比定时鉴别器（Constant Fraction Discriminator，CFD）可以在一定程度上消除信号水平变化带来的行走误差[8]，且其具有良好的时刻鉴别性能和相对简单的结构，成为激光测距机中最广泛使用的时刻提取方法。但是，传统 CFD 电路所采用的高速比较器的性能受制于输入信号的动态范围，输入信号的动态范围越大，行走误差也越大[9-11]。常见的测距系统很难同时兼顾最近距离和最远距离回波信号水平，当近距离处的回波信号通过电路放大后，可能导致输入恒比定时鉴别器的信号饱和，将会引入更大的行走误差，直接影响系统的测距精度和测距范围。

基于以上分析，本文提出了一种基于高速自动增益控制（Automatic Gain Control，AGC）与恒比定时鉴别电路相结合的时刻鉴别方案，根据回波信号水平的变化，高速自适应调节增益大小，在兼顾远距离的小信号可以被探测的同时，避免近距离的信号放大饱和，将处理后的信号电压控制在较窄的动态范围内，结合后续的恒比定时鉴别电路，在较大的回波信号动态范围内实现了稳定的到达时刻鉴别。

1　脉冲激光测距系统的组成

1.1　激光测距系统模型

本文基于 Voxtel 公司的 LAN0-FX0C 型半导体激光器设计，发射脉冲宽度为 8 ns，应用于激光测距系统中，设计指标要求实现 0.1 m 测距精度，必须使得时刻鉴别误差小于 0.67 ns。

脉冲激光测距系统由发射模块、接收模块、时间测量模块和主控模块组成[12-13]，如图 1 所示。激光器在脉冲信号触发下发射激光脉冲，并同步将起始时刻的电信号回传给 TDC 芯片。激光经过目标物体的反射，被光电接收系统聚焦于雪崩光电二极管（APD）光敏面上，通过 APD 的反向特性转换成电流信号，经过跨阻放大器将电流信号转换为电压信号后并放大[14]；时间测量模块利用 AGC 技术与 CFD 技术构成的回波时刻鉴别电路，得到激光脉冲回波的接收时刻，通过 TDC-7200 芯片解算得到精确的时间差，由 MCU 主控制器读取数据，进行数据处理后得到被测目标的距离值。

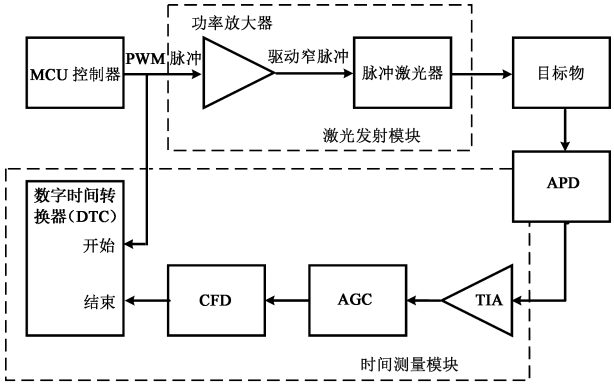


图 1　激光测距系统框图

激光测距系统的核心在于对发射时刻和回波到达时刻的准确提取。时间测量模块中的 AGC 技术用于控制回波信号的增益大小，使进入 CFD 电路的输入信号处于较窄的动态范围，进而减小高速比较器响应时间的变化。CFD 技术则利用高速比较器对输入脉冲的衰减信号与延迟信号进行比较，可以获得回波信号的准确接收时刻，减小由于回波功率变化而导致的行走误差。

1.2　恒比定时鉴别法的原理

传统的 CFD 电路可根据回波信号的幅度水平，在一定范围内动态地调节阈值电平大小，以避免由于信号幅度变化而引起的行走误差。CFD 通常由延时电路、衰减电路和高速比较器构成，如图 2 所示。传输至 CFD 内的回波信号被分为两路，一路经过延时电路处理，另一路经过衰减电路，处理后的两路信号分别作为高速比较器的两路输入信号，取两路信号上升沿的交点作为时刻鉴别点，如图 3 所示。假设输入信号为

$$V(t)=V_0 f_0(t) \tag{1}$$

式中，V_0 是输入信号的幅度，$f_0(t)$ 是输入信号随时

间变化的函数。经过延迟 Δt 的电路信号波形和经过固定衰减后的电路信号波形分别为

$$V_i(t)=V_0 f_0(t-\Delta t) \tag{2}$$

$$V_T(t)=\alpha V_0 f_0(t) \tag{3}$$

式中，α 为信号的衰减系数，令 $V_i(t)=V_T(t)$，由式(2)，(3)可计算出定时点 t_T 满足以下关系：

$$f_0(t_T-\Delta t)=\alpha f_0(t_T) \tag{4}$$

由式(4)可知，如果输入信号的脉冲形状 $f_0(t)$ 不发生变化，仅有幅度 V_0 改变，则 t_T 的位置不会发生变化，即由 t_T 确定的时刻与幅度 V_0 无关。

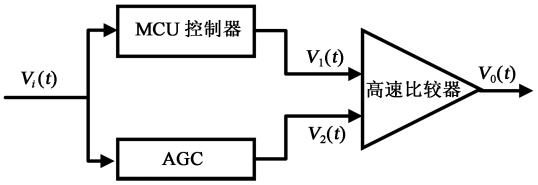


图 2 恒比定时鉴别电路原理图

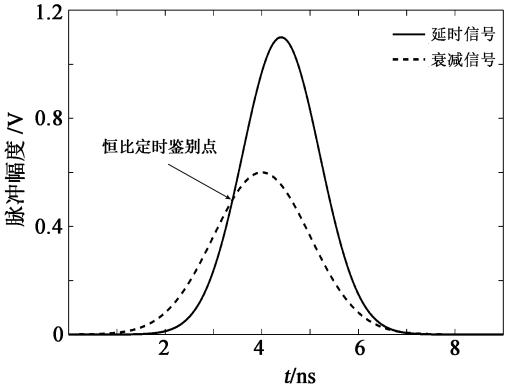


图 3 恒比定时鉴别曲线图

1.3 行走误差的产生及分析

脉冲激光测距系统接收到的回波信号功率主要与目标距离、反射特性有关，测距系统量程越大，不同距离处的信号水平差异也就越大，常见的测距系统很难同时兼顾最近距离和最远距离回波水平。近距离处的回波可能导致输入恒比定时鉴别器的信号饱和，这将使系统产生额外的行走误差[15]。下面用线性模型描述回波信号，对信号饱和引起的行走误差进行分析。

如图 4 所示，$P_1(t)$ 为信号饱和时的脉冲信号，$P_2(t)$ 为正常的回波脉冲信号。假设回波信号处于正常放大区间，信号 $P_1(t)$ 被分为两路，延迟时间为 t_d，衰减系数为 α，电压幅值为 V_z，T_r 为理论回波时刻定时点，与回波信号的幅值无关，只与脉冲形状和衰减系数 α 有关：

$$T_r=\frac{t_d}{1-\alpha} \tag{5}$$

若回波信号出现饱和，饱和时运算放大器的输出电压为 V_m，T'_r 为信号饱和时的回波时刻阈值点，由于饱和漂移误差的影响，实际回波时刻的定时点 T'_r 为

$$T'_r=t_d+\frac{\alpha V_m}{V_z}\times t_r \tag{6}$$

式中，t_r 为回波脉冲的上升沿时间，那么两个阈值点的时间间隔即是时间测量系统的行走误差，记作 T_D：

$$T_D=T_r-T'_r=\frac{\alpha}{1-\alpha}\times t_d-\frac{\alpha V_m}{V_z}\times t_r \tag{7}$$

由式(7)可知，在衰减系数、回波脉冲上升沿的分布保持不变的情况下，行走误差 T_D 可以看作是回波信号电压幅值 V_z 的函数。当 CFD 电路的衰减系数 α 为 0.5、延迟时间 t_d 为 20 ns、脉冲上升沿时间 t_r 为 3 ns、运算放大器的饱和电压 V_m 为 5 V、输入 CFD 电路的幅值为 500 mV～10 V 时，产生的行走误差最大可达 19.25 ns，对应于 2.89 m 的距离误差，此时由于信号饱和引起的行走误差已经极大地影响了系统的测距精度，需要控制输入 CFD 电路的信号动态范围。

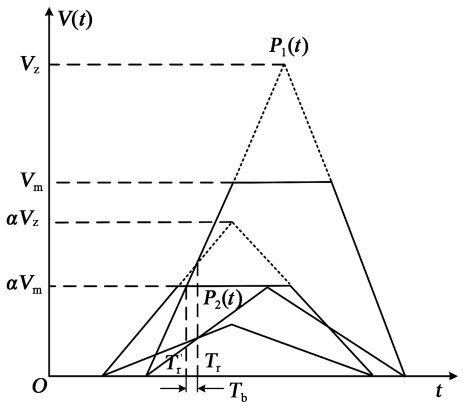


图 4 信号饱和时刻鉴别示意图

2 增益自动控制的恒比鉴别电路

2.1 自动增益电路设计

输入信号的上升时间和脉宽分别为 3 和 8 ns，幅度范围为 50 mV～1.4 V。自动增益电路设计的主要目的是在较短的时间内对输入信号进行处理，使 CFD 电路接收动态范围较小的信号，将输入信号幅度范围控制在 500 mV～1.4 V，动态范围从 29 dB 降低至 9 dB。

AGC 电路的组成如图 5 所示，主要包括三个部分：增益设置模块、延迟模块和可变增益放大器。输

入至 AGC 的信号被分为两路，一路进入增益设置模块进行信号幅度检测，将输入信号的幅值与标准阈值电平进行比较，将量化的结果传递给可变增益放大器；另一路信号进入延迟模块，根据增益设置模块的量化结果，对输入信号进行可变增益放大。

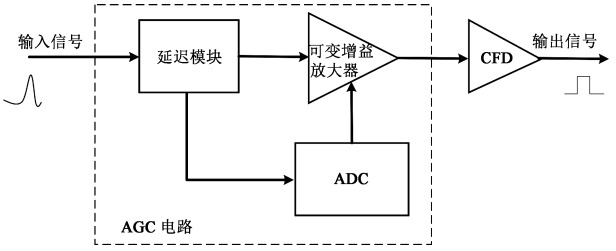


图 5　AGC 电路框图

AGC 电路通过对电压幅值的比较和量化来控制增益的大小，实现自动增益控制。这种适用于时间提取电路的 AGC 电路，具备相对短的传播延迟。本文设计的电路结构在测量精度和电路复杂度之间进行权衡，根据 AGC 和 CFD 组合电路的电压输入范围，设计了四组针对不同电压范围的增益。

表 1 显示了四组输入信号的幅度范围，其动态范围为 50 mV～1.4 V，每组都具有相应的增益，设置的输出信号幅度范围几乎相等，并且最大幅度均为 1.4 V。可以看出，当信号电压幅值增加时，AGC 电路将降低增益，输出幅度适中的电压，避免了输入信号饱和。

表 1　四组输入信号电压增益对照表

组别	输入电压范围/mV	增益/dB	输出电压范围/V
1	50～140	20	0.50～1.4
2	140～280	14	0.70～1.4
3	280～700	6	0.56～1.4
4	700～1 400	0	0.70～1.4

AGC 电路原理如图 6 所示，包括增益设置模块、延时电路和可变增益放大器。为了将输入信号分为四组并为每组设置不同的增益，增益设置模块由运算放大器、比较器和设置阈值电平的排阻网络组成。增益设置模块通过电压跟随器对输入信号进行隔离，比较器将输入信号与阈值电平进行比较，通过幅度比较后一次性设置增益，可以完成信号能量的划分和增益设置。

可变增益放大器部分由运算放大器和场效应管等分立元件组成。由于比较器输出信号和 MOS 管导通需要一定的稳定时间，比较器 MAX999 的上升时间最大为 4.5 ns，MOS 管开启时间为 12 ns，因此，通过延迟线设置 20 ns 左右的延迟时间，同时系统的响应速度在 25 ns 以内。AGC 电路第一个固定增益放大器的放大倍数为 1.83，以补偿通过延迟线的分压。第二级放大器为可调增益放大器，利用 MOS 管的高速通断设置运算放大器反相端的并联电阻值，控制电路增益使其分别具有 0，6，14 和 20 dB 四个离散的电路增益。本设计中使用了电压反馈的高速运算放大器 OPA699，它具有 1 GHz 的增益带宽积，在增益为 20 dB 时，具有 100 MHz 的带宽，保证信号放大后不会失真。

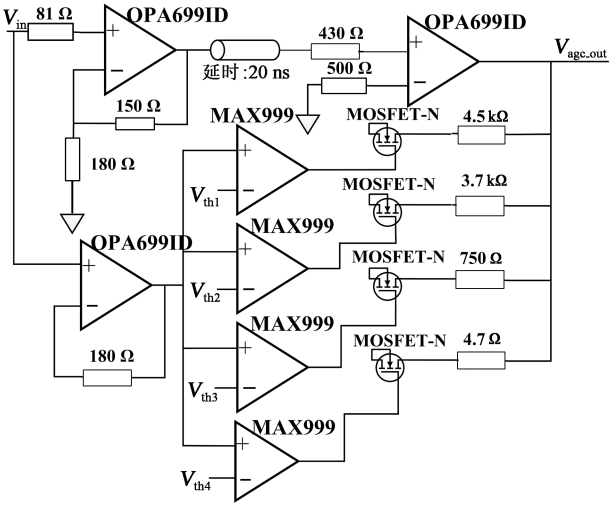


图 6　AGC 电路原理图

2.2　恒比鉴别电路设计

CFD 的设计原理如图 7 所示，主要由输入部分的运算放大器和高速比较器组成。CFD 输入信号的上升时间和脉宽分别为 3 和 8 ns，幅度范围为 500 mV～1.4 V。一路信号经过延时，考虑到信号上升时间、脉宽和信号电压，将延迟时间设置为 3 ns，电路放大倍数设置为 5 倍；另一路电路放大倍数设置为 3 倍，衰减系数为 0.6。电路中 C_1，C_2 和 C_3 作为隔直电路，运算放大器放大交流信号，对于直流偏置电压作为电压跟随器使用，电阻 R_6，R_7，R_9 和 R_{10} 增大电流，增加电路的抗干扰能力，并且控制运算放大器的输出摆幅。

CFD 电路中，U_1 部分的输入电压和输出电压与自动增益电路部分的输出电压的关系可以表示为

$$\frac{V_{agc_out}-V_{in1}}{R_1}=\frac{V_{in1}+5V}{R_3} \tag{8}$$

U_3 部分的输出电压为

$$V_{o3}=-2.5V+\frac{2V_{agc_out}}{3}\times\frac{R_{14}+R_{15}}{R_{15}}=$$

$$-2.5V+3V_{agc_out} \tag{9}$$

U_2 部分的电压为

$$V_{o2}=-2.5V+V_{agc_out}\times\frac{R_{12}+R_{13}}{R_{12}}= -2.5V+5V_{agc_out} \tag{10}$$

由式(9)与(10)可知，CFD 电路使用的运算放大器输出摆幅为－2.5～5 V。

CFD 电路的高速比较器会被 APD 的输入噪声以及电路噪声干扰，任何小振幅的噪声脉冲都会导致鉴别器误触发。本文设计了一种结构简单的预鉴别比较器，通过设置固定阈值，解决了系统的误触发问题，原理如图 8 所示。

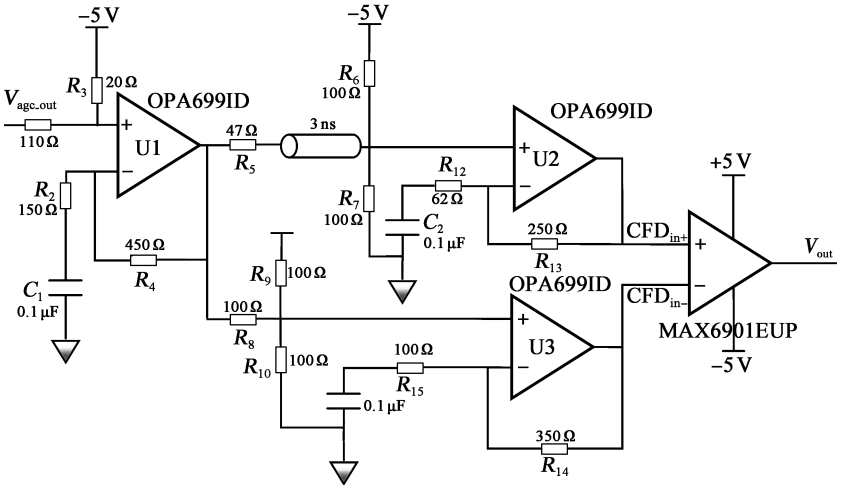


图 7 CFD 模块原理图

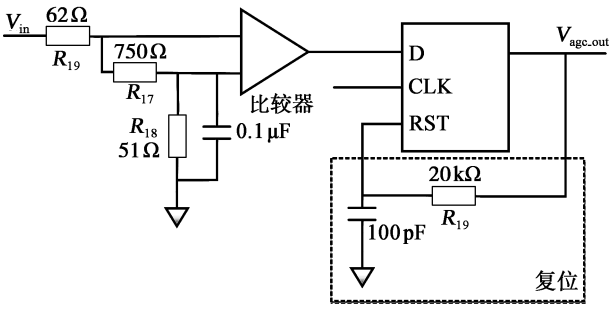


图 8 预鉴别比较器原理图

CFD 的衰减信号分出一路信号进行预处理，经过分压和延时电路获得输入信号，电路通过分压电阻设置了最小阈值，高速比较器的输入电压为

$$V_{in+}=\frac{R_{17}+R_{18}}{R_{18}}V_{in} \tag{11}$$

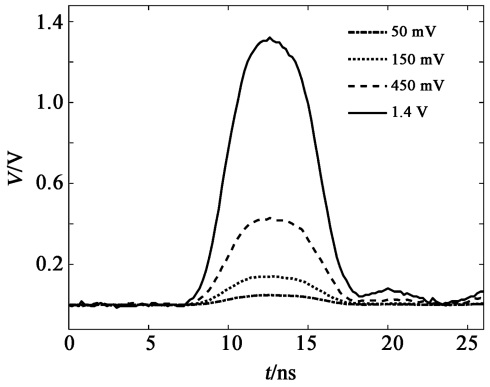
式中，噪声阈值由 R_{17} 与 R_{18} 组成的分压电路设置，可选择适当的阈值来消除噪声引起的误判。高速比较器在输入信号的上升沿被触发并输出一个正的脉冲信号。这个脉冲信号用作由上升沿触发的 D 触发器的输入端，在真实回波信号的上升沿开始存储信息。同时，将 D 触发器时钟输入端直接连到 CFD 电路的输出端，当 CFD 输出的鉴别信号来临时，将会引起 D 触发器触发。

电路被触发后，D 触发器通过外部电路进行复位，通过改变复位电路中的 R 和 C，可以控制比较器输出脉冲的波形，实现时间选通功能。

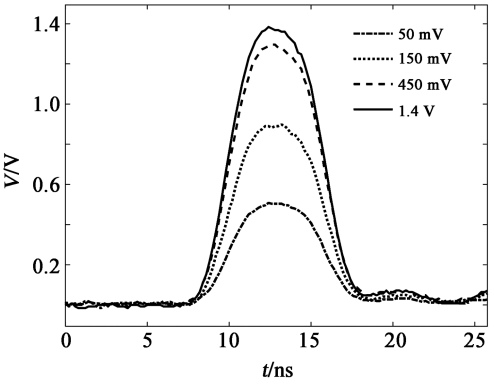
3 实验结果及分析

为了验证上述激光雷达时间测量系统的可行性和正确性，通过实验测试了 AGC 电路与 CFD 电路的性能。由 AFG3152C 信号发生器产生的输入信号上升时间为 3 ns，脉冲宽度为 8 ns，幅度在 50 mV～1.4 V，通过同轴电缆连接到测试板，CFD 电路中利用延迟线设置了 3 ns 的延时，用示波器记录电路输出信号脉冲的波形，通过 USB2.0 导出记录数据，利用 MATLAB 画出曲线图。

首先对 AGC 电路进行测试，图 9(a)和(b)比较了 AGC 电路的输入和输出信号电压幅度的关系，当输入信号幅度范围为 50 mV～1.4 V 时，输出信号的幅度范围在 500 mV～1.4 V，电压幅度对应于 9 dB 的动态范围，与输入信号相比减小了 20 dB。如图 10 所示，当输入信号的电压在 50 mV～1.4 V 之间变化时，记录输出信号电压，输出信号的幅度范围在 500 mV～1.4 V，与设计相符合。图 11 显示了增益变化曲线，AGC 电路针对四个输入电压范围分别具有四个离散增益，增益与输入信号的幅度成反比，增益范围在 20 dB～0 dB。



（a）　输入信号



（b）　输出信号

图 9　AGC 电路输入输出信号

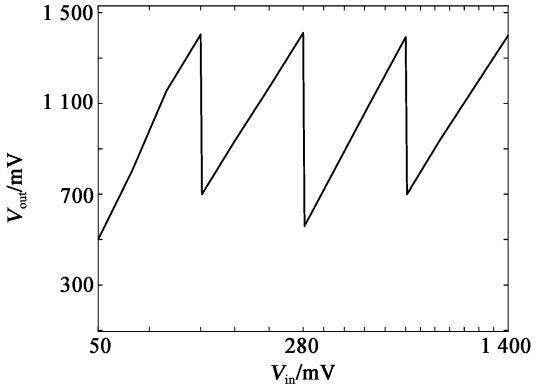


图 10　AGC 电路输出电压幅度范围图

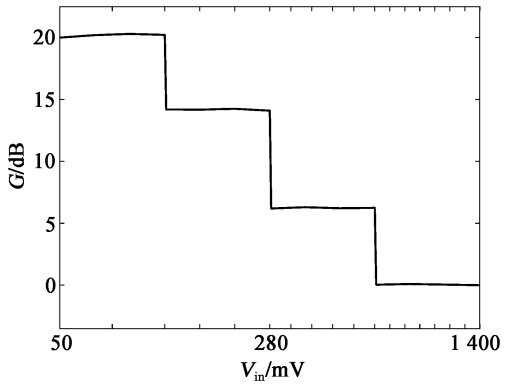
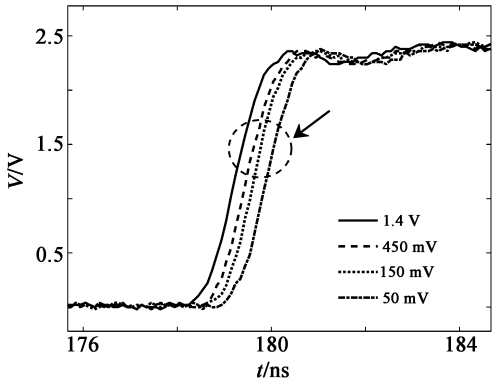
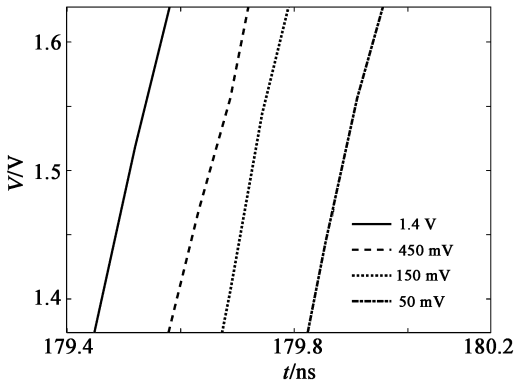


图 11　增益曲线图

其次测试 AGC 和 CFD 组合电路的定时性能，将幅度分别为 50 mV，150 mV，450 mV，1.4 V 的脉冲作为输入信号，通过示波器记录 AGC 和 CFD 组合电路在鉴别时刻的输出脉冲响应时间与时间差，并画出曲线图，如图 12 所示。可以看出，随着输入信号幅度的增加，输出信号的响应速度越来越快。图 12(b)是图 12(a)中圆圈所示部分，表示对应有 3 ns 上升时间和 29 dB 动态范围的输入信号。输入信号按照电压幅度被划分为四个组，信号电压被控制在一定范围内，因此，随着输入信号幅度的增加，尽管响应时间在各自组的范围内递增，但是可以将时间差保持在较窄的范围，将回波时刻鉴别误差控制在 0.42 ns 内。



（a）　输出脉冲波形



（b）　局部波形放大显示

图 12　CFD 电路比较器输出脉冲波形

实验结果表明 AGC 和 CFD 电路相结合的方案表现出了良好的时刻鉴别性能，可以有效地控制行走误差，进而提升整个激光雷达时刻测量系统的测量精度和测量范围。

4　结论

针对脉冲激光测距系统受到回波信号动态范围

影响，导致在时刻测量中产生额外行走误差的问题，本文提出一种AGC技术与CFD技术相结合的激光雷达时刻测量方案。实验结果表明，AGC电路位于CFD电路前，稳定了CFD电路中高速比较器的信号输入范围，解决了较大回波动态范围所导致的行走误差问题，显著减小了由回波信号不同峰值造成的行走误差，是一种提高脉冲激光测距系统测距精度和测距范围的有效方案。

参考文献：

[1] 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 H，Luo P，Li X L. 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.

[2] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2005.
Hu C S. Investigation into the high-speed pulese laser diode 3D-imaging ladar[D]. Changsha：National University of Defense Technology，2005.

[3] 林 晶. 近程脉冲激光测距仪的设计[D]. 南京：南京理工大学，2018.
Lin J. Design of short-range pulse laser rangefinder[D]. Nanjing：Nanjing University of Science and Technology，2018.

[4] 许万鹏，黄庚华. 基于恒比定时鉴别的激光雷达时间测量前沿技术研究[J]. 红外，2014，35(4)：18-24.
Xu W P，Huang G H. Research on advanced technology of time measurement for LIDAR based in constant-fraction discrimination[J]. Infrared，2014，35(4)：18-24.

[5] 路统霄，张有润，章玉飞，等. 一种用于激光脉冲测距的恒比定时电路[J]. 微电子学，2019，49(6)：812-816.
Lu T X，Zhang Y R，Zhang Y F，et al. A constant fraction discriminator for laser pulse ranging[J]. Microelectronics，2019，49(6)：812-816.

[6] 姜海娇，来建成，王春勇，等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光，2011，38(5)：234-240.
Jiang H J，Lai J C，Wang C Y，et al. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy[J]. Chinese J. of Lasers，2011，38(5)：234-240.

[7] 赵大龙，陈千颂，秦来贵，等. 脉冲激光测距漂移误差的研究[J]. 中国激光，2004(9)：1112-1116.
Zhao D L，Chen Q S，Qin L G，et al. Study on walk error in pulsed laser range-finding[J]. Chinese J. of Lasers，2004(9)：1112-1116.

[8] 于玉亭，涂德凤. 脉冲激光测距误差分析及精度提高改进方法[J]. 新乡学院学报，2018，35(6)：69-72.
Yu Y T，Tu D F. Error analysis and method for improving the pulsed laser ranging accuracy[J]. J. of Xinxiang University，2018，35(6)：69-72.

[9] Lim Hiansang. Constant fraction discriminator involving automatic gain control to reduce time walk[J]. IEEE Trans. on Nuclear Science，2014：2351-2356.

[10] 黄民双，刘晓晨，马 鹏. 脉冲飞行时间激光测距系统中周期误差补偿[J]. 红外与激光工程，2018，47(3)：229-233.
Huang M S，Liu X C，Ma P. Periodic error compensation of pulsed time-of-flight laser ranging system[J]. Infrared and Laser Engineering，2018，47(3)：229-233.

[11] Yang Jinqing，Liu Xiaolei，Gu Guohua，et al. A double threshold correction method for walk error in pulsed laser ranging system[J]. Infrared Physics and Technology，2019，100(2019)：28-36.

[12] 蒋宇帆. 便携式半导体激光测距仪的设计与实现[D]. 重庆：重庆大学，2018.
Jiang Y F. Design and implementation of portable semiconductor laser rangefinder[D]. Chongqing：Chongqing University，2018.

[13] 黄民双. 单发脉冲飞行时间激光测距技术[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(12)：69-75.
Huang M S. Time-of-flight laser ranging technique of single transmitted pulse[J]. Laser and Optoelectronics Progress，2017，54(12)：69-75.

[14] 高 远，李 松. 温度控制与温度补偿双模式的APD驱动电路设计[J]. 半导体光电，2019，40(6)：869-873.
Gao Y，Li S. APD drive circuit design for temperature control and temperature compensation dual mode[J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(6)：869-873.

[15] 张乐琪，查冰婷，张 合. 激光引信饱和漂移误差消除算法[J]. 红外与激光工程，2018，47(12)：46-51.
Zhang L Q，Cha B T，Zhang H. Method of eliminating saturation drift error of laser fuze[J]. Infrared and Laser Engineering，2018，47(12)：46-51.

作者简介：

郭守罡(1995—)，男，山西太原人，硕士生，研究方向为激光雷达测距系统；

李 松(1965—)，女，湖北人，博士，教授，博士生导师，研究方向为星载激光雷达信号处理。