光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023111702

高重频激光地面足印探测器峰检电路的设计

梅 超，向雨琰，于文博，冯 伟，李 松*

（武汉大学 电子信息学院，武汉 430072）

摘 要： 设计了一款两级峰值检测电路，实现对上升沿为 3 ns、脉宽为 5 ns、下降沿为 3 ns、重频为 10 kHz 的脉冲信号的峰值检测与保持，利用 STM32 单片机的模数转换器完成电压信号采集。给出以 APD 为光电探测器件的地面探测器系统的基本结构框图，利用探测器系统中的放大电路模块使接收激光脉冲宽度从 1 ns 展宽至 5 ns，搭配峰值检测电路模块实现窄脉宽、高重频激光信号的检测与数据记录。利用信号源完成峰值检测电路部分的功能测试，使用重频为 1 kHz、脉宽约为 1 ns 的激光器完成探测器系统整体的功能测试，实验证明此系统可以较好地检测并记录该激光信号的峰值。

关键词： 星载激光测高仪；激光足印探测器；脉冲信号；峰值检测

中图分类号： TN247 **文章编号：** 1001－5868(2024)02－0280－06

Design of Peak Detection Circuit for High Heavy Frequency Laser Terrestrial Footprint Detector

MEI Chao, XIANG Yuyan, YU Wenbo, FENG Wei, LI Song

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, CHN)

Abstract: In this study, a two-stage peak detection circuit was designed to realize the peak detection and holding of a narrow pulse signal with a rising edge of 3 ns, pulse width of 5 ns, falling edge of 3 ns, and re-frequency of 10 kHz. The voltage-signal acquisition was accomplished using the analog-to-digital converter of an STM32 microcontroller. The basic structure of the ground detector with an APD as the photodetector is given in the block diagram, where the amplifier circuit module in the detector system is used to increase the width of the received laser pulse from 1 ns to 5 ns. The peak detection circuit module is used to detect and record the data of the narrow pulse. The signal source was used to complete a functional test of the peak detection circuit, and a laser with a heavy frequency of 1 kHz and pulse width of approximately 1 ns was used to test the whole detector system. The results verified that this system could better detect and record the peak of this laser signal.

Key words: on-board laser altimeter; laser footprint detector; pulse signal; peak detection

0 引言

激光测高仪的在轨检校是提升其精度的重要手段，地面探测器法是实现激光测高仪在轨检校的常用方法之一。其主要原理为在卫星激光测高仪足印过境之前，在地面铺设探测器阵列，利用地面探测器捕获激光测高仪的激光足印求取其足印中心位置结合探测器准确的地面坐标位置，求取激光足印中心的地面坐标位置，利用几何检校模型求取激光指向角偏差量，修正指向角从而提升测高精度[1]。地面探测器主要功能为实现光电转换，对微弱的光脉冲信号进行放大后获取信号的峰值电压。

收稿日期：2023－11－17.

基金项目：湖北省重点研发计划项目(2022BID016).

* **通信作者：**李 松

随着激光测高仪的发展，光子计数型激光测高仪如 ATLAS 得到了广泛的应用，其发射激光的重频达到 10 kHz，脉宽减小到 1.5 ns[2]，我国激光测高仪正向光子计数型方向发展。要实现对光子计数型激光测高仪的检校，需要地面探测器具备检测高重频、窄脉宽激光信号的功能。现有的探测器能探测的激光脉宽在 4 ns 以上，其峰值检测与保持电路输出信号的脉宽也在纳秒量级[3]，对纳秒级信号进行采样量化实现模数转换时，根据奈奎斯特采样定理，AD 转换芯片采样速率需接近或者达到 GHz 水平[4]，对 AD 采样芯片要求较高，但探测器成本增加，不合实际。因此，需要新的峰值检测保持电路，提升脉冲信号峰值保持时间，以满足常规 AD 芯片最低的采样时间要求，降低对 AD 采样芯片的要求[5]。此外，对于高重频的脉冲激光信号进行检测时，需要峰值检测电路具有自动放电功能，防止上一次的检测结果影响到下一次检测。进行足印探测时，探测器需要获取光斑的边缘能量和中心能量，要求探测器具有一定的动态范围，最小动态范围为 e^2，即峰值检测电路能检测的最高电压值与最低电压值之比最小约为 8。

峰值检测电路主要有两种，即电压型峰值保持电路和跨导型峰值保持电路。电压型峰值保持电路利用普通电压型运算放大器作为检测器件，运算放大器放大倍数较大，输出电压较大，电路电流较大，过冲现象严重，可能影响电路稳定性[6]。此外，电压型峰值保持电路由于运算放大器本身具有一定电路延时，响应速度较慢，通频带较低，不适用于纳秒级窄脉冲信号的峰值检测[7]。跨导型峰值检测电路过冲较小，器件带宽大，响应速度快，动态范围大，稳定性好，可以实现纳秒级信号的峰值检测[8]。

本文选用德州仪器的高速跨导放大器 OPA860 设计两级峰值检测电路实现频率为 10 kHz、上升沿和下降沿均为 3 ns、脉宽为 5 ns 的信号的峰值检测及保持。选择 STM32F103RET6 作为系统的主控，其具有 12 位的高速模数转换器，最短采样时间约为 1 μs，利用其中断机制实现记录激光脉冲峰值电压、峰值检测模块自动放电的功能。利用信号源对峰值检测模块进行测试，记录不同输入电压条件下电路的输出电压。同时，给出地面探测器系统的结构框图，说明探测器各个模块的功能，最终使用激光器产生脉宽为 1 ns、重频为 1 kHz 的激光，利用探测器接收，验证探测器系统的整体功能。

1　峰值检测电路理论分析

如图 1 所示，跨导型峰值检测电路主要由跨导放大器（OTA）、二极管、电压缓冲器（BUF）和保持电容组成，电压缓冲器输出反馈到跨导放大器的输入端，跨导放大器可以看成一个双向三极管结构，类似一个压控电流源。当跨导放大器输入端口 B 的电压大于输入端口 E 的电压时，即输入信号上升沿到来时，输出端口 C 输出正向电流，此时二极管 D_1 导通给保持电容 C_1 充电，保持电容两端的电压经过电压缓冲器进行一定延时后反馈到跨导放大器，跨导放大器 E 端口的信号相对于 B 端口有一定延时和电压差。当信号峰值到来时，B 端口电压暂时大于 E 端口电压，电容继续充电，直到其两端电压等于输入信号峰值。当信号下降沿到来时，E 端口电压始终大于 B 端口电压，C 端口输出一个负向电流，二极管的单向导电性使其截至，保持电容上的电压保持峰值不变。由于跨导放大器的跨导一般比较小，输入信号的峰值时间较短，且电压缓冲器的响应速度快，两输入端口之间的电压差值较小，因此给电容充电的电流较小，电路的过冲小、速度快。图中二极管一般选用响应速度快的肖特基二极管，保持电容选取漏电流较小的聚苯乙烯电容。

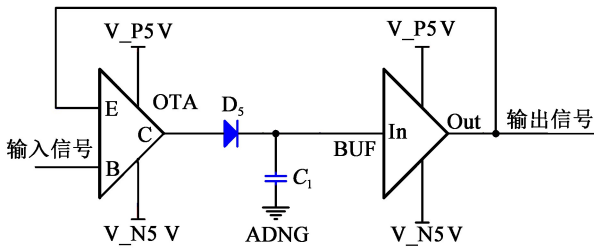


图 1　跨导型峰值检测电路原理图

电容 C_1 两端的电压表示为[9]：

$$V_C = V_{BE} \times g_m \times \frac{\tau_r}{C} \tag{1}$$

式中，V_{BE} 为跨导放大器两输入端口的电压差，一般小于 0.4 V[10]。g_m 为跨导放大器的跨导系数，τ_r 为信号上升沿宽度。可以看出，保持电容的大小决定了峰值检测电路的最大输出电压。保持电容取值较大时，电路能检测的最大电压值下降，同时，保持电容的增大会使整个电路的带宽减小。

为了满足信号带宽要求，电容 C_1 的大小需满足下式[11]：

$$C < \frac{g_m \times \tau_r}{2 \times \pi \times 0.35} \tag{2}$$

此外，对跨导放大器而言，其带宽需要大于待检测信号的带宽，信号带宽可表示为：

$$f_s = \frac{0.35}{\tau_r} \tag{3}$$

由式(3)计算可知，对于上升沿 3 ns 的信号，跨导放大器带宽需 116 MHz 以上，OPA860 的闭环带宽为 470 MHz，满足带宽要求。同时，OPA860 的 g_m 约为 102 mA/V，最小输出电流 9 mA。假定需检测电压最大值为 3.3 V，OPA860 输出电流为 20 mA，由式(1)计算可得保持电容最大值不应超过 18 pF；由式(2)计算可得电容最大值不超过 140 pF。实际上，电容的取值应在满足式(2)的条件下尽量取大一点，可以接近或者略大于式(1)的理论计算值。

由上，搭建电路如下图 2。

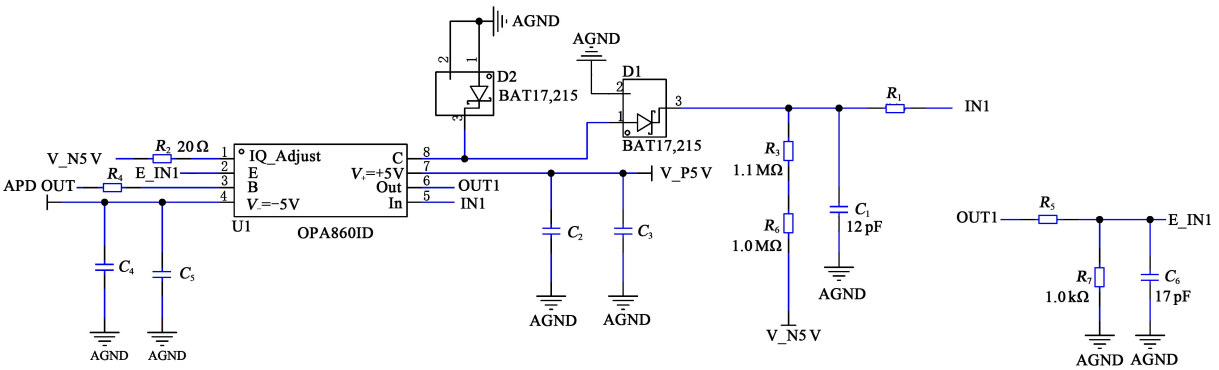


图 2 第一级峰值检测电路

其中电阻 R_2 用于确定 OPA860 芯片的跨导系数，R_3 和 R_6 用于消除 OPA860 自带的高速缓冲器的输入偏置电流，调节 OPA860 自带电压缓冲器的输入偏置电压，以防止信号淹没在偏置电压中。C_6 用于控制信号缓冲延时时间、提升或减小输出电压，二极管 D2 为 OPA860 静态工作时提供一个电流回路。

由于芯片自带电压缓冲器存在输入偏置电流，利用电阻消除偏置电流的同时也为保持电容 C_1 提供一个放电回路，芯片的偏置电流一般在 5 μA 以内，电路中引入负电源来提高消除偏置电流的电阻的阻值，提升峰值保持时长。但电容 C_1 的取值较小，峰值保持时间较短，只有几百纳秒，小于 AD 采样芯片最低采样时间，因此再加一级峰值检测电路，增大保持电容，提高峰值保持时间。经测试，电容 C_1 完全放电时间为几十微秒，对于 10 kHz 频率的信号来说，两个脉冲的时间间隔为 100 μs，大于电容完全放电时间。同时，由于保持电容的电容值较小，容易受到后级电路干扰使峰值检测结果误差增大，因此第一级峰值检测电路不加额外的放电装置。第二级峰值检测电路如下图 3 所示。

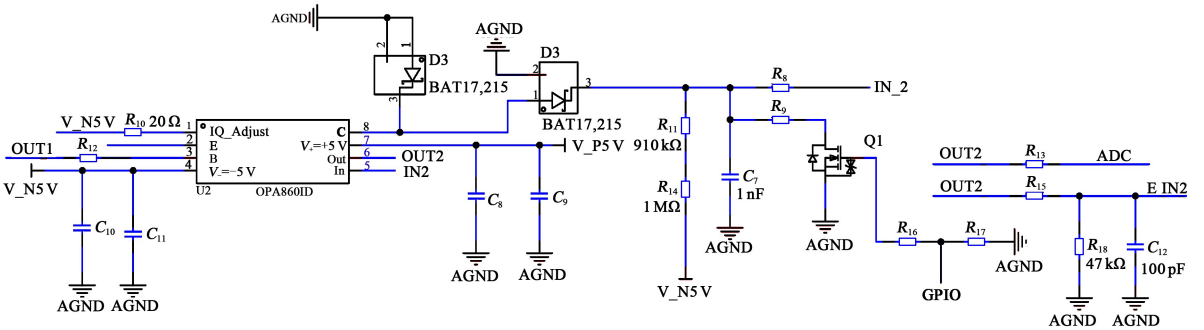


图 3 第二级峰值检测电路

第二级使用大电容作为保持电容，充电时间较长，因此第二级检测到的峰值电压应为第一级保持电容的放电曲线与第二级保持电容的充电曲线的交点处的电压。理论上，可认为第一级峰值检测电路输出信号下降到输入信号幅值的时间就是第一级峰值保持电路的保持时间，实验测试约为几百纳秒。由公式(2)计算可知，第二级检测电路的保持电容可以增大至 nF 量级。

本文第二级峰值检测电路选用 1 nF 的电容作为保持电容，其输出接到单片机的 ADC 引脚，实现电压采集功能，同时利用单片机的一个 GPIO 口驱动场效应管完成电路的自动放电功能。

图 2 和图 3 中未注明取值的电容和电阻主要用于电源滤波和电路阻抗匹配。

2　探测器系统电路结构框图

足印探测器整体系统构成框图如图 4。

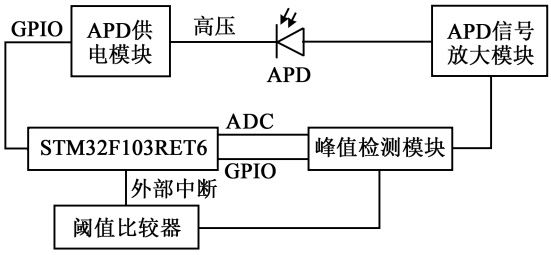


图 4　足印探测器系统结构

APD 供电模块在 MCU 的控制下产生需要的高电压驱动 APD，APD 信号经过光电转换放大后作为峰值检测模块的输入信号，同时，控制 APD 信号放大模块中的跨阻放大器带宽为 100 MHz，使放大后的信号脉宽展宽至 5 ns 左右，上升沿与下降沿均在 3 ns 以内。峰值检测模块将信号峰值保持一段时间，同时使用电压比较器来产生单片机外部中断通知单片机进行 AD 采样，记录采样数据。峰值保持时间由单片机软件控制，单片机 AD 采样结束后通过一个 GPIO 管脚驱动峰值检测模块中的场效应管进行放电，等待下一个激光脉冲到来。

3　峰值检测电路实验结果

由于此峰值检测电路的第一级使用的电容容值较小，其充放电速度较快，第一级检测电路的保持时间较短，在输入信号电压值较低时，第二级检测电路的电容充电时间大于第一级检测电路信号保持时间，因此第二级检测电路检测到的信号相比输入信号峰值必有下降，导致该电路在低压时采集到的数据误差较大，这是电路结构引起系统误差，且检测结果直接存储于单片机中，理论上可以通过单片机对测量值进行软件修正，减小峰值检测误差。

实际测试时，将峰值检测电路与前端 APD 信号放大电路断开，直接使用信号源产生振幅为 80 mV～3.5 V、上升沿和下降沿均为 3 ns、脉宽为 5 ns、频率为 10 kHz 的脉冲信号作为峰值检测电路的输入信号，软件设置单片机采样时间为 21 μs。电路整体输出接到示波器上，同时单片机外接 OLED 屏幕显示 AD 采样结果。记录信号源输入信号幅值，示波器信号振幅，单片机采样信号，结果如表 1。

表 1　峰值检测模块实验数据表

信号源电压/mV	示波器电压/mV	单片机电压/mV	保持误差/%	信号源电压/mV	示波器电压/mV	单片机电压/mV	保持误差/%
80	60	34	57.5	2 000	1 960	1 940	3.0
200	152	154	23.0	2 200	2 180	2 175	1.1
400	350	349	12.8	2 400	2 440	2 403	0.2
600	548	546	9.0	2 600	2 620	2 645	1.7
800	756	732	8.5	2 800	2 780	2 785	0.5
1 000	952	925	7.5	3 000	3 000	2 972	0.9
1 200	1 120	1 125	6.3	3 200	3 080	3 094	3.3
1 400	1 336	1 314	6.2	3 300	3 140	3 142	4.7
1 600	1 500	1 510	5.6	3 400	3 180	3 184	6.4
1 800	1 720	1 718	4.6	3 500	3 240	3 121	10.8

由表中数据分析可知，输入信号较小时，单片机 ADC 采集到的电压值与信号峰值差距较大，原因是单片机的采样结果是 21 μs 内多次采样结果的算数平均值，但小信号峰值无法保持 21 μs，输出电压相比峰值有较大的跌落，取平均之后最终结果与峰值之间的差距较大。输入信号较大时，由于跨导放大器的输出电流与信号脉宽有限，信号脉宽较窄，第一级保持电容在信号上升阶段电压无法达到信号峰值，此外，经实验发现信号源产生的脉冲信号负峰值不为 0 V，信号源实际输出信号峰值与理论值有一定差距。

峰值检测电路模块实验测试结果如下图 5－7 所示，输入信号的电压值分别为 80 mV，1.0 V，3.3 V。输入信号皆为上升沿为 3 ns、下降沿 3 ns、脉宽 5 ns、频率为 10 kHz 的脉冲信号。其中，通道 3 的信号为信号源原始输出信号，通道 1 的信号为第一级峰值检测电路的输出信号，通道 2 信号为第二级峰值检测电路的输出信号。实验使用的示波器型号为 RIGOL MSO8304A，信号源型号为：Tektronix AFG3152C。

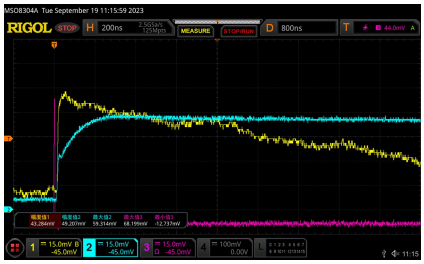


图 5 80 mV 信号峰值检测输出波形图

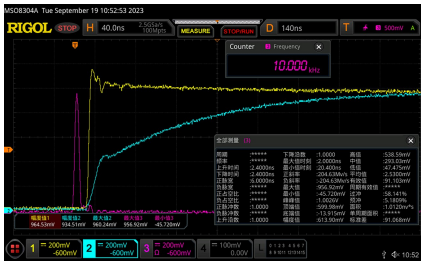


图 6 1.0 V 信号峰值检测输出波形图

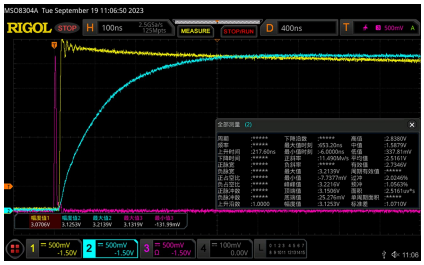


图 7 3.3 V 信号峰值检测输出波形图

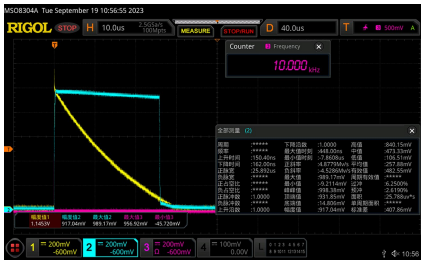


图 8 1.0 V 输入时单个脉冲峰值检测输出波形图

由图 5 可以看出，输入信号电压较低时，第一级峰值检测电路保持时间很短，小于第二级保持电容充电时间，导致第二级检测到的信号幅值偏小。信号较大时，从图 6，图 7 和图 8 可以看出，第二级峰值检测值检测的输出信号幅度值与信号源输入信号的最大值接近，即峰值检测电路可以较好地检测到输入信号的峰值。

图 8 为峰值检测电路单个脉冲整体输出波形，可以看出，在单片机的控制下，由于单片机软件执行需要一定时间，信号幅值保持时间约为 26 μs，信号峰值在保持时间内约有 10%的下降，单片机获取到的电压约为最大值的 95%。同时，第一级峰值检测电路处于自然放电状态，其输出曲线为电容的放电曲线。

特别地，对于电压值为 80 mV 的信号，其输出波形如图 9 所示。可以看出，由于放电回路的存在，在单片机采样期间峰值检测模块输出电压值下降约 50%，理论上单片机采样电压值约为最大值的 75%，约 35 mV。电压信号幅值较小时，电容存储的电荷量少，放电时间短，这是电路结构与第二级保持电容值选取较大造成的系统误差，可以通过单片机后期数据处理来减小。

利用激光器产生 532 nm 波长，重频 1 KHz 的激光，放大电路中跨阻放大器带宽设置为 100 MHz，放大电路输出信号及峰值检测输出信号如下图 10 和图 11 所示。

从上图 10 可以看出，经放大电路放大后的信号上升时间 2.8 ns，下降时间 2.3 ns，脉宽 4.2 ns，比信号源信号脉宽更窄。

从图 11 可以看出，峰值检测电路模块可以较好地检测并保持放大后的信号的峰值。

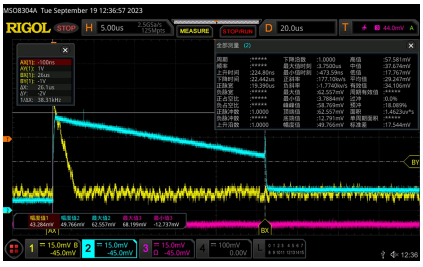


图 9 80 mV 信号峰值检测输出波形图

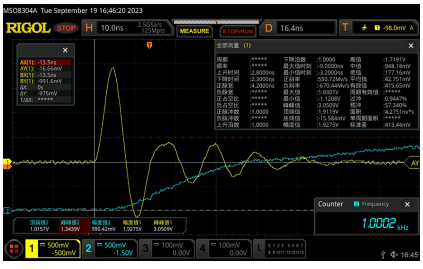


图 10 APD 放大模块输出信号波形图

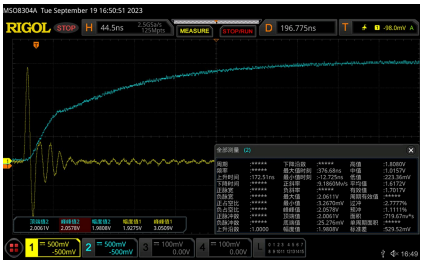


图 11 光信号峰值检测输出波形图

4 结论

本文利用跨导放大器设计了适用于窄脉冲激光

信号的两级峰值检测电路，搭配由单片机为主控构成的数字电路，APD 信号放大电路等构成适用于高重频、窄脉宽激光信号检测的地面探测器系统。利用信号源产生 10 kHz 频率脉冲信号验证了峰值检测电路对高重频、窄脉宽的脉冲信号检测的可行性，使用激光器验证整体探测器的功能，实验表明电路整体工作正常。

参考文献：

[1] 谢俊峰，刘　仁，王宗伟，等. 高分七号星载激光测高仪在轨几何检校与精度评估[J]. 红外与激光工程，2021，50(8)：20200396.
Xie Junfeng，Liu Ren，Wang Zongwei，et al. In-orbit geometric calibration and accuracy evaluation of GaoFen-7 spaceborne laser altimeter[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(8)：20200396.

[2] Markus T，Neumann T，Martino A，et al. The Ice，cloud，and land elevation satellite-2 (ICESat-2)：Science requirements，concept，and implementation[J]. Remote Sensing of Environment，2017，190：260-273.

[3] 刘恩超，李　新，张允祥，等. 卫星激光测高仪在轨检校脉冲探测器的设计、测试及应用[J]. 大气与环境光学学报，2021，16(6)：541-552.
Liu Enchao，Li Xin，Zhang Yunxiang，et al. Design，test and application of pulse detector for on-orbit calibration of satellite laser altimeter[J]. J. of Atmospheric and Environmental Optics，2021，16(6)：541-552.

[4] Zheng H，Ma R，Wang X，et al. A CMOS peak detect and hold circuit with auto-adjust charging current for NS-scale pulse ToF lidar application[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Ⅰ Regul. Pap.，2020，67(12)：4409-4419.

[5] 蒋　衍，朱精果，刘汝卿，等. 脉冲激光多回波峰值检测电路设计[J]. 红外与激光工程，2023，52(5)：20220625.
Jiang Yan，Zhu Jingguo，Liu Ruqing，et al. Design of pulse laser multi-echo peak detection circuit[J]. Infrared and Laser Engineering，2023，52(5)：20220625.

[6] 宋毅恒，孟凡斌. 窄脉冲峰值保持电路分析及设计[J]. 光电技术应用，2014，29(2)：39.
Song Yiheng，Meng Fanbin. Analysis and design of peak holding circuit for narrow pulse[J]. Electro-Optic Technology Application，2014，29(2)：39.

[7] 熊　焱，陆耀东，祝　敏，等. 窄脉冲激光信号峰值保持电路设计[J]. 激光与红外，2012，42(12)：1377-1380.
Xiong Yan，Lu Yaodong，Zhu Min，et al. Design of peak holding circuit for narrow laser pulse[J]. Laser & Infrared，2012，42(12)：1377-1380.

[8] 肖云凤，黄光明. 宽输入动态范围峰值保持电路设计[J]. 核电子学与探测技术，2020，2(40)：359-363.
Xiao Yunfeng，Huang Guangming. Design of wide input dynamic range peak holding circuit[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology，2020，2(40)：359-363.

[9] Texas Instruments. Wide bandwidth operational transconductance amplifier and buffer OPA860[Z]. Texas Instruments，2005.

[10] 马　超，刘恩海. 窄脉冲信号的峰值保持方法[J]. 半导体光电，2013，34(3)：521-523，528.
Ma Chao，Liu Enhai. Peak holding circuit for fast narrow pulse[J]. Semiconductor Optoelectronics，2013，34(3)：521-523，528.

[11] 陈国杰，曹　辉，周有平. 脉冲峰值保持器的设计方法与元件选择[J]. 核电子学与探测技术，2011，31(12)：1378-1380，1385.
Chen Guojie，Cao Hui，Zhou Youping. Design method and element selection of peak holder for fast pulse[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology，2011，31(12)：1378-1380，1385.

作者简介：

梅　超(1999—)，男，硕士研究生，主要研究方向为光电子检测；

李　松(1965—)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事卫星激光遥感与设备方面的研究。