

# 火焰触发器用自适应信号处理电路设计

姜波, 田会

(西安工业大学 光电工程学院, 西安 710021)

**摘要:** 为解决火焰触发器无法依据天空背景亮度自动调整电路增益, 易于出现信号饱和和无信号输出的问题; 基于乘法除法运算原理, 文中设计了一种新型前馈型 AGC 电路用以扩大火焰触发器的动态范围; 输入信号经峰值采集电路、过峰时刻判断电路、峰值保持电路、除法电路后生成增益控制电压, 增益控制电压与经延时的原始信号相乘, 实现对输入信号的自适应放大; 经模拟实验验证, 该电路可有效将 80 mV~1 V 范围内的模拟信号放大至 5 V, 电路动态范围 15 dB~35 dB、延迟时间 100  $\mu$ s, 输出信号信号幅值波动较小, 最大误差小于 5%。

**关键词:** 火焰触发器; 前馈式 AGC; 模拟信号延时; 峰值保持电路; 除法与乘法电路

## Adaptive Signal Processing Circuit Design for Flame Trigger

Jiang Bo, Tian Hui

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the flame trigger cannot automatically adjust the gain according to the sky background brightness, which usually result in the situation of signal saturation and no signal output. Based on the principle of multiplication and division, a novel feedforward AGC circuit is designed to expand the dynamic range of the flame trigger. The gain control voltage, which generates by a peak acquisition circuit, a peak over determination circuit, a hold circuit, and a division circuit, is multiplied by the delayed original signal to achieve adaptive amplification of the input signal. It is verified by simulation experiments that the circuit can effectively amplify the analog signal in the range of 80 mV~1 V to 5 V. The dynamic range of the circuit is 15dB~35dB. The delay time is 100 $\mu$ s. The amplitude of the output signal fluctuates less. The maximum error is less than 5%.

**Keywords:** flame trigger; feedforward AGC; analog signal delay; peak hold circuit; division and multiplication circuit

## 0 引言

为评价武器系统总体性能, 分析研究武器系统内、外弹道和终点弹道性能, 在武器研制、生产与交验过程中需准确测量武器系统飞行姿态、运动轨迹和攻角等参数<sup>[1]</sup>。由于武器作用时间短, 采用高速图像或数据采集设备需要快速可靠的外触发信号进行工作。传统外触发信号来源主要有断靶线、声传感器<sup>[2]</sup>、天幕靶<sup>[3]</sup>和火焰触发器<sup>[4]</sup>, 其中断靶线放置在枪口处, 需人工接线安全性差; 天幕靶在工作时需要天空作为背景光源, 仅能白天工作; 声传感器容易受环境风的干扰, 可靠性差; 火焰触发器能够探测弹丸击发瞬间产生的火焰或空中爆炸时产生的火光, 输出触发信号, 实时性高, 应用较为广泛。

现有火焰触发器无法根据外界光照环境自适应调整信号处理电路增益, 动态范围有限, 在不同天空照度下会出现信号饱和或无信号输出的问题。背景光较强时, 火焰触发器探测灵敏度急剧下降, 无法可靠探测炮口火光, 为解决上述问题, 设计一种前馈型 AGC 电路代替原固定增益电

路, 根据输入信号大小自动调整信号处理电路的增益, 增加动态信号范围, 扩大火焰触发器适用范围。

## 1 自适应信号处理电路工作原理

设计使用峰值检测、除法电路、乘法电路构成一种前馈型 AGC 电路<sup>[5]</sup>, 相比于用压控增益芯片或者数控增益芯片实现的前馈式 AGC 电路, 省去复杂算法设计问题, 又具有前馈型 AGC 电路的各种优点, 如具有快速的响应时间, 信号检测和增益控制并行等优点<sup>[6-7]</sup>。

信号处理电路根据输入信号的幅值自动调整电路增益, 具体实现方法: 利用延时电路把原始信号延迟 100  $\mu$ s, 该延时时间是依据控制信号产生时间确定, 保证控制信号在原始信号到达乘法运算电路之前; 峰值检测电路精确检测出输入信号峰值的大小, 通过除法电路把参考电压和采集到的峰值信号相除从而计算出增益控制因子, 在把延时之后的原始信号通过乘法电路和增益控制因子相乘, 可以把输入信号放大到所设置的被除数电压(参考电压)附近, 实现自动增益控制, 确保输出信号的幅值始终保持在一定幅值范围内<sup>[8]</sup>。

根据弹丸击发时产生的火焰特性<sup>[9-11]</sup>, 现有的火焰触发器用前级放大电路输出信号的幅值范围 80~300 mV, 频率在 10 kHz 以内的模拟信号, 图 1 为整体自适应信号处理电路增益控制实现原理图。

将信号进行 5 倍放大后分成三路, 第 1 路由峰值采集电

收稿日期: 2018-09-11; 修回日期: 2018-10-17。

基金项目: 国家自然科学基金(60972005); 国防科工局基础预研项目(JSJL2017208B009); 陕西省教育厅重点实验室项目(17JS050)资助。

作者简介: 姜波(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电测试与信号处理方向的研究。

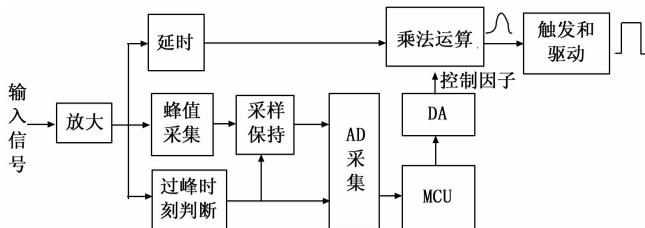


图1 信号处理电路增益控制实现框图

路采集到电路峰值,并保持一段时间;第2路经过峰时刻判断电路产生一个与峰值时刻相对应的跳变电平信号,该电平信号有两个作用:一是控制采样保持电路工作状态,采样保持电路检测到由低电平跳变为高电平时,采样保持电路工作状态由采样状态转变为保持状态,可有效保持住峰值采集电路采集的峰值信息;二是给除法电路中AD采集提供开始信号,一旦峰值信号到来,启动AD采集,把峰值信息读入单片机作为除法电路除数电压。被除数电压取为AD采集的参考电压,所除的结果通过单片机输出到DA转换芯片转化为电压信号,该电压信号为增益控制电压。第3路为主信号回路,经过 $100\ \mu\text{s}$ 延时后,与增益控制电压进行乘法运算,输出幅值稳定的模拟信号,最后经触发和驱动电路产生一个与弹丸击发时刻相对应的触发脉冲信号,用于触发外弹道测试设备。

## 2 自适应信号处理电路实现

### 2.1 电路工作过程分析

信号处理电路原理图如图2,其中采用抗混叠滤波器实现模拟信号延时<sup>[12]</sup>,抗混叠滤波器多用于AD采集之前,防止频率混叠,它具有群延时特性,正是利用他的群延时特性设计了模拟延时电路;精密峰值采集电路主要是利用电容两端电压不能突变原理,对电容充放电从而实现峰值采集,具体见后面电路模块设计介绍;过峰时刻判断电路由微分电路和电压比较电路组成,微分电路把输入信号波峰和波谷都转换为过零点,过零电压比较器在电压值为零处分别转换为高低电平,后续电路通过检测过峰判断电路输出电平变化就可判断出峰值时刻; $\bar{S}/H$ 是采样保持电路,使用集成芯片SMP04实现,采样保持状态由过峰判断信号改变,当峰值到来之前该芯片工作在采样状态,峰值时刻到来时,状态由采样状态变为保持状态,可以及时的把峰值信号保持下来,供后续电路使用;利用MCU的AD采集端口采集峰值信号,MCU同时也进行除法运算,用参考电压除以峰值信号,相除结果在通过DA芯片转化为电压信号,该电压信号即为增益控制电压(控制因子);利用四象限模拟乘法器AD633JN实现乘法运算,增益控制电压和经延时之后的原始信号经过乘法电路后输出幅值稳定的模拟信号,由于模拟乘法器在进行乘法运算时会将相乘结果除以10输出,所以为得到原始结果,需在后续电路设计一个20dB的同相放大电路。

探测器输出的火焰信号与半矢正弦波类似,频率小于

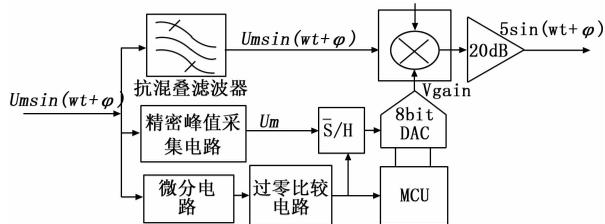


图2 信号处理电路原理图

10 kHz,设定整个过程中信号为 $U$ ,表达式为 $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ ,则峰值采集电路采集到的信号峰值为 $U_m$ ,单片机通过AD采集获取到 $U_m$ 并转化为数字量,把 $U_m$ 作为除法运算被除数,除数取单片机AD采集的参考电压也就是单片机的内部参考电压 $V_{ref} = 1.344\ \text{V}$ ,得到相除之后结果 $V_1$ :

$$V_1 = \frac{V_{ref}}{U_m} = \frac{1.344}{U_m} \quad (1)$$

$$V_{gain} = \frac{1.344}{U_m} * \frac{5}{1.344} = \frac{5}{U_m} \quad (2)$$

$V_1$ 经过DA转换输出增益控制电压 $V_{gain}$ ,如(2)式,AD采集时参考电压为1.344 V,而DA转化时参考电压取电源电压5 V,由于参考电压不同,经DA转换后输出信号 $V_{gain}$ 相当于对 $V_1$ 进行了放大,放大倍数为参考电压之比 $5/1.344 = 3.72$ 倍。

增益控制电压和经延时之后的输入信号经过乘法电路相乘输出为 $U_{out}$ :

$$U_{out} = V_{gain} * U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

把式(1)、(2)带入(3)中,得 $U_{out} = 5 \sin(\omega t + \varphi)$ ,可知无论输入信号峰值如何变化,经乘法和除法运算后,输出模拟信号都在5 V范围内波动,并且幅值恒为5 V。

### 2.2 电路各模块设计

#### 2.2.1 抗混叠滤波电路

抗混叠滤波器一般指低通滤波器,利用滤波器群延时特性实现模拟信号的延时。滤波器的群延时特性是指不同频率的一群信号经过滤波器之后产生的信号延时,它是滤波器相频特性在各个频率所对应的斜率(取绝对值)。滤波器相频特性为理想情况时,通频带内具有平缓波特曲线,相频特性为一条直线,即相频特性的斜率处处相等,所有通频带内信号通过滤波器时,都会产生延时,并且延时时间相等,都等于相频特性曲线斜率(群延时);延时的大小与滤波器的相频特性有关。滤波器相频特性为非理想情况时,不同频率的信号分量通过滤波器都会产生延时,但他们的延时时间都不相等,这是由于滤波器相频特性曲线并非一条直线,所以不同频率分量的信号会有不同的延时,也就导致了输入信号出现相位失真。不同的截止频率,不同的滤波器阶数都会产生不同的群延时。带通滤波器和高通滤波器都是通过低通滤波器进行频率变换得到,由于在频率变换时没有对滤波器的群延时特性加以保护,所以它们的相位失真很严重。由于bessel滤波器具有最佳的群延

时特性，基于此设计 bessel 低通滤波器实现模拟信号延时功能。

设计四阶截止频率 20k 的 bessel 低通滤波器，群延时特性如图 3。火焰触发器探测的枪口火光信号频率范围 1~20 kHz，延时电路使一定频率宽度的一群信号延迟一段时间，设计时应保证该频率范围的火光信号处于群延时范围内，延时电路主要作用是保证控制信号在原始信号到达乘法运算电路之前生成，根据控制信号产生所需时间，延时时间为 100 μs。一个四阶截止频率 20 k 的 bessel 延时时间约为 21 μs，可通过级联实现更长时间的延时。采用 5 个四阶 bessel 低通滤波器可将原始信号延时 100 μs 左右。图 4 为用 Sallen-Key 电路单元设计的 4 阶 bessel 低通滤波器（延时电路）电路拓扑图。

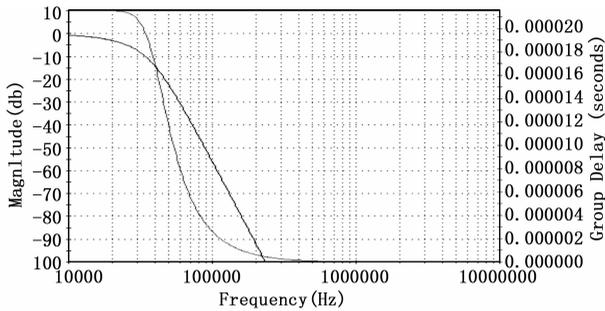


图 3 四阶 bessel 群延时特性

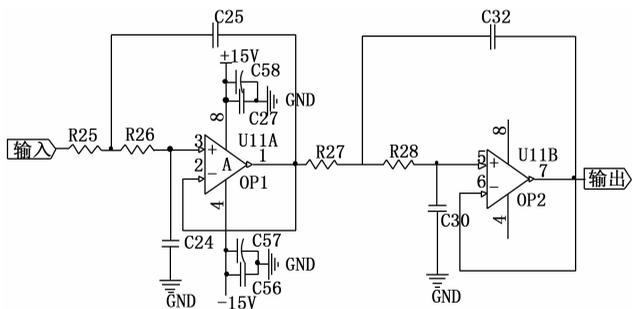


图 4 四阶 bessel 滤波器电路

### 2.2.2 峰值采集与保持电路

峰值检测技术就是一种能跟随输入信号变化并能将最大值记忆下来的电路。根据输入信号频率范围 1~20 k 设计的带有保持作用的峰值采集电路如图 5 所示，为了让电路拥有更好的直流性能使用电压反馈型双运放芯片 AD826，它内部集成有两个电压反馈型运放 U1A 和 U1B，输入信号上升过程：输出端信号小于输入端信号，即运放的反向端电压小于同向端电压，此时二极管 D2 两端加正向电压导通，电容 C13 充电，运放 U1B 做电压跟随器，7 脚输出等于 3 脚输入，同时 7 脚输出电压通过 R6 加到 U1A 反向端；输入信号下降过程：D1 两端加正向电压导通，D2 截止，R9 一端电压为 7 脚输出电压，此时流过 D2 的反向电流通过 R9，保持了 D2 负极的电压，并且有效抑制了 D3 的反向电流。使电容 C13 上电压保持为峰值电压，同时电容 C13 上的电压通过电压跟随电路输出，7 脚输出为 C13 上保持的

电压，从而实现峰值采集和保持。峰值采集电路的充放电电容 C13 与峰值保持时间密切相关，电容 C13 越小充电越快越能快速准确检测脉冲信号峰值但保持时间短不利于采集，电容越大放电速度越慢保持时间长，但大电容不利于缝制的采集，所以 C13 取值要折中考虑。图 6 是该电容取值为 0.039μF 时峰值采集电路波形，该电路可精确采集到 10 KHZ 信号的峰值信息，但该电路采集的峰值电压下降速率很快，后续电路采样困难。为了解决此问题，引入保持电路，保持电路使用集成采样保持芯片 SMP04，它的采样保持状态由  $\bar{S}/H$  引脚电平状态决定。峰值采集和峰值保持整体电路如图 5，保持电路的工作状态由过峰时刻判断电路改变，峰值采集电路、过峰时刻判断电路和保持电路三者配合使峰值信息以很低的电压下垂率下降。具体工作过程：峰值时刻到来之前，过峰判断电路输出为低电平，引脚输入低电平，内部开关闭合，电容充电，采样保持电路输出为跟随状态，SMP04 处于信号采集状态；峰值时刻到来时，过峰判断电路输出为高电平，输入高电平，内部开关断开，电容放电，采样保持电路输出为电容上保持的电压，SMP04 处于保持状态。峰值保持电路配合过峰时刻判断电路，可以实现峰值信号的保持，保持的峰值信号在通过 AD 采集读入单片机，供后续电路处理。

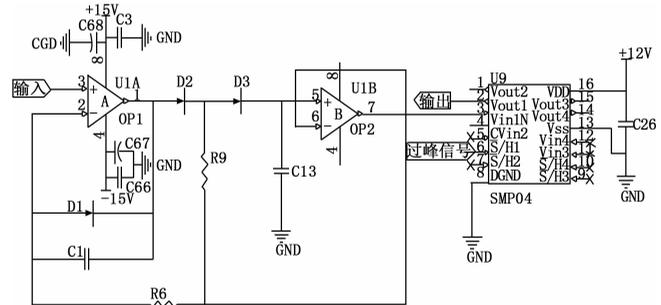


图 5 峰值保持电路

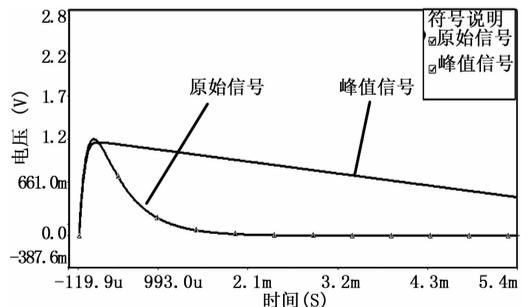


图 6 输出峰值信号（电容取值 0.039 μF）

### 2.2.3 过峰时刻判断电路

作用：产生一个与过峰时刻相对应的脉冲信号，该脉冲信号控制峰值保持电路开始保持同时启动 AD 采集把峰值信息读入单片机。

过峰时刻判断电路采用微分电路和过零比较器组合实现。反向端电容 C2、反馈路电阻 R7 以及运放构成基本微分电路。C7 为旁路电容，可有效降低高频噪声。过零比较

器使用 LM111 和外围电路构成,当输入波形处于上升阶段时,微分电路输出为负,D4 两端加正向电压导通,比较器 LM111 上同向端电压小于反向端电压,比较器 6 脚输出低电平;当输入波形处于下降阶段时,微分电路输出为正,D4 两端加反向电压截止,此时 LM111 同向端电压大于反向端,比较器 6 脚输出高电平。电路如图 7。

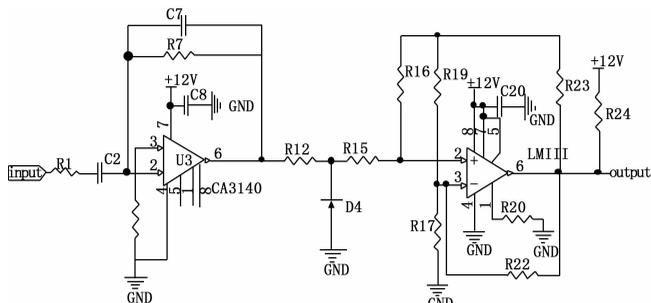


图 7 过峰时刻判断电路

输入波形经过微分电路后波谷和波峰都转换为过零点,过零电压比较器判断出过零点时刻并输出对应高低电平,通过检测出电平变化可以有效得到波峰和波谷对应时刻。波峰值对应由低电平到高电平变化,采样保持芯片检测到此电平变化即认为峰值到来,由采样过程变为保持过程,可有效保持峰值信息。

### 2.2.4 除法电路与乘法电路

除法电路的作用是计算出增益控制因数,先通过 AD 采集把峰值信号读入单片机,转换后的数字信号作为除法电路分母,分子取 AD 转换的参考电压,运算结果通过 DA 转化成对应电流信号,电流信号经过流压转换电路转换为电压信号,该电压信号即为增益控制电压,增益控制电压与输入信号经乘法电路相乘,实现输入信号自适应放大。除法电路整体电路如图 8。

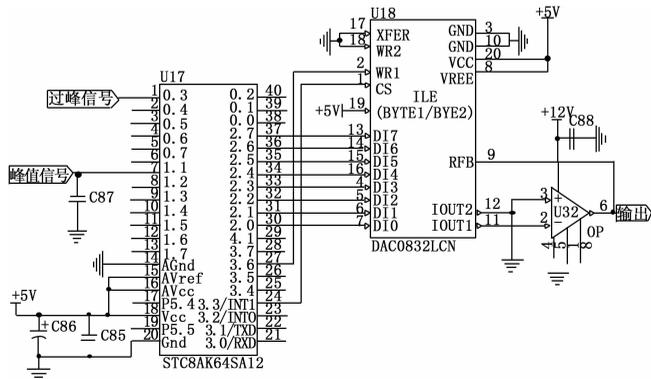


图 8 除法运算电路

DAC0832 是电流输出型 DAC,当需要转化为电压输出时,可外接运算放大器实现流压转换,DA 芯片的片选控制信号与单片机的外部中断 0 连接,DA 芯片的与单片机的连接,单片机的 2.0-2.7 作为 8 位并行输出直接与 DAC0832 输入脚相连接,单片机计算结束后 3.6 和 3.3 分别置低电平,当  $\overline{CS}$  和  $\overline{WR1}$  均为低电平时,单片机数据读入

DAC0832 输入锁存器;和均为低电平控制 DAC 寄存器开启,数据传入 DAC 内部 D/A 转换器;外接运放 CA3140,可以把输出的电流信号转化为电压信号。

当过峰时刻判断电路检测到峰值时刻,输出一个与峰值时刻相对应的高电平信号,单片机检测到此信号后启动 AD 转换,AD 每转换完成一次会触发中断,采集 5 个点之后,设置关闭 AD 模块,把五个点的数据进行比较,取最大值,参考电压除以该最大值,相除结果经过 DA 模块变成模拟电压信号。程序流程图如图 9 所示。

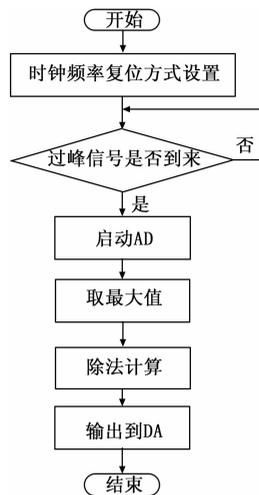


图 9 单片机程序流程

乘法电路使用四象限模拟乘法器 AD633,AD633 有 X 和 Y 两个高阻抗输入和一个求和输入 Z,该 AD633 精度为满量程的 2%,采用激光校准,高阻抗输入 Y 非线性度通常小于 0.1%,1 MHz 带宽,20 V/ $\mu$ s 压摆率,AD633 输出 W 可以驱动容性负载,AD633 使用简单,价格低,被广泛应用。AD633 做乘法器使用时,整体的传递函数为:

$$w = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (4)$$

根据传递函数表达式,把  $X_2$ 、 $Y_1$  和 Z 接地,此时输出  $W = -\frac{X_1 Y_2}{10}$ ,之所以接成反向乘法器是由于除法电路输出为负电压,经过反向乘法电路输出为经调制之后的正向电压,作为比较电路的输入。乘法电路和除法电路配合实现自适应控制。

### 3 试验验证与分析

为了验证设计电路的性能,将信号发生器输出幅值为 300 mV、频率 10k 半正弦信号作为信号处理电路的输入信号,经过第一级放大电路进行 5 倍后,输入给延时模块、峰值采集模块和过峰判断模块,利用示波器测量各个模块电路输出的信号,如图 10,图中 CH3 为是原始输入信号;CH2 为是峰值采集电路模块采集的峰值信号,该峰值信号经过采样保持电路后,峰值信息以 2 mV/s 速率下降,能很好保持住峰值信息;CH4 为最终经过乘法电路后输出的信号,该信号相对于输入信号延时了 100  $\mu$ s,幅值约为 5 V。

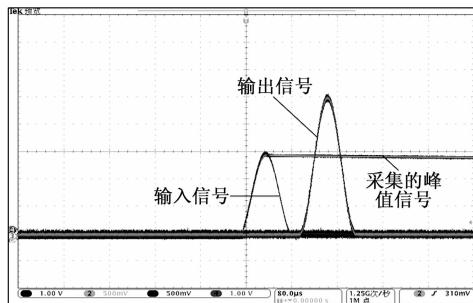


图 10 测试波形

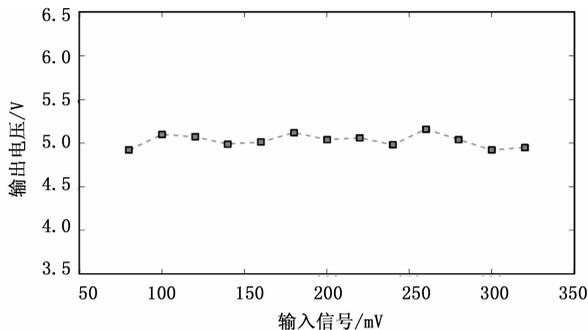


图 11 输出幅值曲线

当设计输入信号在 80~300 mV 范围内变化时, 输出信号幅值始终在 5 V 附近, 图 11 是实测不同输入信号幅值所对应的输出信号幅值曲线, 验证了设计电路的有效性。

从输出幅值曲线可以看出输出信号幅值存在一定的波动, 这是由于在进行除法运算时, 通过 12 位 AD 采入峰值信息, 只读取结果高八位, 导致除数比实际采的值小一点, 使运算结果变大; 而且在进行除法运算时, 相除的结果有小数的情况很常见, 在读取时只读取小数后 2 位, 因此所读取的运算结果比实际计算的结果小, 这两个因素再加上电路本身会产生误差导致输出结果在 5 V 周围有微小的波动。输出信号幅值基本稳定在 5 V, 最大误差不超过输出的 5%。

#### 4 结论

针对现有火焰触发器动态范围不足问题, 设计一种自适应信号处理电路, 用于扩大火焰触发器的动态范围。其结论如下:

(1) 设计了前馈型 AGC 电路代替火焰触发器原电路, 通过峰值采集电路、过峰时刻判断电路、保持电路、除法电路, 生成增益控制电压, 增益控制电压与经延时电路之

后的原始信号通过乘法运算电路相乘实现对原始信号的自适应放大。

(2) 信号处理电路能够根据输入信号峰值大小自动调整信号处理电路增益, 解决了火焰触发器由于天空背景光照变化而出现的信号饱和或无信号输出问题, 扩大了火焰触发器的动态范围;

(3) 实测证明: 利用乘法运算设计的 AGC 电路, 具有很好的稳定性, 最大输出误差小于理论值的 5%, 可满足火焰触发器快速可靠的触发要求。

#### 参考文献:

- [1] 张林, 李永新, 高云山. CDD 交汇光靶布站方式的优化设计与数值模拟 [J]. 弹箭与制导学报 2006, 26 (2): 1022-1023.
- [2] 王宝元, 衡刚, 周发明, 等. 火炮立靶密集度测量方法 [J]. 测试技术学报 2011, 35 (6): 529-35.
- [3] 倪晋平, 魏建凯. 天幕靶技术研究进展 [J]. 西安工业大学学报, 2011, 31 (7): 589-596.
- [4] 魏桂香, 姜波. 一种数字式红外火焰探测器 [J]. 北京理工大学学报, 1999 (5): 134-136.
- [5] 申浩煜. 高线性度高速 AGC 电路分析与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [6] Perez J P A, Calvo B, Celma S. A High-Performance CMOS Feedforward AGC Circuit for a WLAN Receiver [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (8): 2851-2857.
- [7] Mughal FA, Sultan F, Imran M. Wide dynamic range automatic gain control using feed forward and backward technique [A]. International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology [C]. IEEE, 2013: 412-415.
- [8] Perez J P A, Pueyo S C, Lopez B C. Automatic Gain Control [M]. Springer Fachmedien, 2011.
- [9] 李雨成, 毕秋苹, 刘天奇. 混合煤质协同作用下煤尘爆炸火焰特性研究 [J]. 煤炭科学技术, 2017, 45 (4): 68-71.
- [10] Kim H I, Kim Y J, Lee K H, et al. Investigation on the flame characteristics in a PCCI engine using endoscope system with micro-cassegrain [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15 (7).
- [11] 欧益宏, 李润, 袁广强, 等. 半密闭空间油气爆炸初期火焰特性研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14 (2): 157-162.
- [12] 王存, 王志刚, 王猛. 一种大动态范围的实时数控 AGC 电路的设计 [J]. 电子元器件应用, 2010, 12 (11): 39-41.
- [13] 李永新, 张林, 高云山. A High-Performance AGC Circuit for a WLAN Receiver [A]. International Conference [C]. Goettingen: IEEE, 2013: 1-10.
- [14] Yamaguchi F, Nishi H. Hardware-based Hash Functions for Network Applications [A]. Networks, 19th IEEE Internet Conference [C]. Singapore: IEEE, 2013: 1-6.
- [15] 吴中杰. 星载数据路由复接与存储技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 庞波, 郝维宁, 张文峰, 等. 一种 SRAM-FPGA 在轨重构的工程实现方案 [J]. 航天器工程, 2017, 26 (5): 51-56.

(上接第 167 页)

- [3] 张俊俊, 陈庆华, 乔庐峰, 等. 高性能星载 IP 交换路由查找算法的研究与实现 [J]. 通信技术, 2015, 48 (12): 1395-1399.
- [4] 张琦, 金胤丞, 李苗, 等. Trie 树路由查找算法在网络处理器中的实现 [J]. 计算机工程, 2014, 40 (1): 98-102.
- [5] Xi T, Yan Q. Guided Multiple Hashing: Achieving Near Perfect Balance for Fast Routing Lookup [A]. ICNP, 21th International