

文章编号: 1001-3806(2015)04-0510-05

基于光电倍增管的自动增益控制技术研究

汪 锋¹, 孙开江², 向小梅¹

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 湛江 524022; 2. 长江武汉航道局, 武汉 430014)

摘要: 为了压缩水下无线光通信系统中接收光信号的动态范围、提高有效通信距离, 从自动增益控制技术的基础理论入手, 利用光电倍增管增益可随工作电压改变的特性, 设计出基于光电倍增管实现的自动增益控制电路, 其数字控制部分以单片机为核心, 并在空气中模拟水下实验。结果表明, 该电路可以对接收光信号实现 40dB 的压缩, 提高了水下无线光通信的有效范围。

关键词: 光通信; 动态范围; 自动增益控制; 光电倍增管

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.018

Research of automatic gain control technology based on photomultipliers

WANG Feng¹, SUN Kaijiang², XIANG Xiaomei¹

(1. 91388 Unit, Chinese People's Liberation Army, Zhanjiang 524022, China; 2. Changjiang Wuhan Waterway Bureau, Wuhan 430014, China)

Abstract: In order to compress the dynamic range of the received optical signal in an underwater optical wireless communication system and increase the effective distance of communication, automatic gain control circuit based on variable gain photomultipliers was designed from the basic theory of automatic gain control technology. Single chip microcomputer was the core of the digital control part. The underwater experiment was imitated in the air. The results show that the dynamic range of received optical signal is compressed for 40dB and the effective range of underwater wireless optical communication is improved.

Key words: optical communication; dynamic range; auto gain control; photomultiplier tube

引 言

水下无线光通信系统的优势主要体现在军事用途, 其一般应用于潜艇、无人水下航行器 (unmanned underwater vehicle, UUV)、蛙人等^[1]。海水水质的不同决定了光在水下衰减系数不同; 水下无线光通信系统的工作特点决定了因发射、接收装置的空间定位及空间取向造成的对准状态不同, 很容易就造成接收信号强弱的很大变化; 海水中的浮游生物体也可以造成接收信号强弱变化甚至暂时的中断。海军的全球作战使命要求适应不同的应用环境, 所以水下无线光通信系统接收端必须具备接收大动态范围信号的能力^[2-3]。自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 技术被广泛应用于广播、电视、通信、雷达、声纳等电子系统的接收机中, 其主要作用是通过增益调整使接收机射频单

元的输出电平保持基本恒定, 从而减小由信道衰落等因素所造成的信号波动对接收机的影响^[4]。本文中从自动增益控制技术的基础理论入手, 利用光电倍增管的特性, 研究适用水下无线光通信系统的 AGC 技术。

1 光电倍增管的特性和 AGC 基本原理

光电倍增管是建立在光电子发射效应、二次电子发射效应和电子光学理论的基础上, 将微弱信号转换成光电子并获得倍增效应的真空光电发射器件。在水下无线光通信系统中, 光电倍增管是接收端的核心器件, 它的质量好坏决定了整个无线光通信系统的能力强弱。日本的滨松公司的 R7400 型高速光电倍增管是一种典型光电倍增管, 其主要参量如表 1 所示^[5]。光电倍增管 R7400 工作在高压状态下, 同样采用滨松公司的 C4900 型高压模块电源为其供电, 它的增益可随工作电压改变, 即高压模块电源的输出电压可控制光电倍增管 R7400 的增益。图 1 描述的是光电倍增管 R7400U 增益随其加载在两端工作电压大小变化的关系。

作者简介: 汪 锋 (1986-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事水下光通信信号处理技术、传感器应用技术、水声信号处理技术的研究。

E-mail: wang.805.feng@qq.com

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-07-25

Table 1 Main parameters of photomultiplier tubes

parameter	minimum	typical	maximum
wavelength	300nm		650nm
responsibility		4.3×10^4 A/W	
response time		0.78ns	
working voltage		1000V	
detector square		8mm	

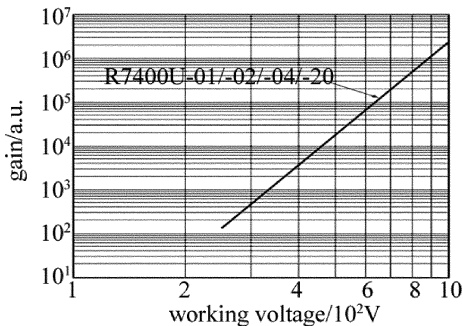


Fig. 1 Relationship of R7400U's gain and working voltage

AGC 系统其实就是一种压缩动态范围的控制系
统,其根据接收信号的强弱,自适应地调整电路增益,
使得信号幅度在小范围内波动。AGC 技术的研究就
是 AGC 电路的研究,AGC 电路其实是一种典型的反
馈伺服系统,很多人对此有详细的论述^[6-7]。

图 2 是一个典型的反向 AGC 电路的原理框图。
其环路主要包括峰值检测电路、对数放大电路、比较电
路、环路滤波电路、可变增益放大器等部分。它的工作
原理是将输出信号的电平或峰值功率与参考值 U_{ref}
相比较,差值分量经过环路滤波产生调整增益的电压值,
通过增益调整使得输出信号电平或峰值功率与参考值
保持一致。

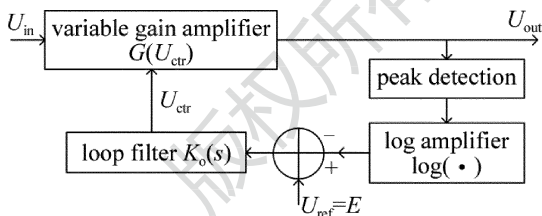


Fig. 2 Typical AGC loop

2 基于光电倍增管的特性实现 AGC 电路

考虑模拟 AGC 电路对于干扰信号很敏感、容易使传
输的信号发生幅度相位畸变等,其可靠性、稳定性和适
应性存在局限性^[7],难以实现复杂、灵活的 AGC 算法,
本文中采用数控 AGC 电路。根据光电倍增管 R7400U
具有增益可调的特性,即光电倍增管的增益大小由高
压模块电源电路的输出电压决定。设计如图 3 所示
AGC 电路,其由峰值采样/保持电路、数字控制电路
和高压模块电源电路组成。当输出信号 U_{out} 被峰值采
样/保持电路处理后送入数字控制电路,得到一个控

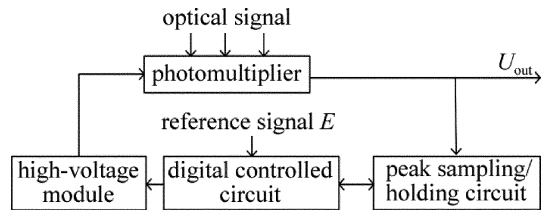


Fig. 3 AGC based on photomultipliers

制高压模块电源输出电压的控制信号,从而调节光电
倍增管的增益,完成自动增益控制功能。

2.1 对高压模块 C4900 的控制

C4900 控制输出电压如图 4 所示,图中 IC 是集
成电路(integrated circuit, IC)。用(0~5)V 的电压控制,
所接负载就是光电倍增管 R7400U。因为 C4900 的⑤
脚上有其内部参考电压,其典型值为 5.13V,所以
C4900 的输出电压控制曲线如图 5 所示。参考文献
[5]和参考文献[8]中给出了 R7400U 的典型增益值
为 7×10^5 ,为了使增益在典型增益值周围变化,由图 1
和图 5 可设定 R7400U 的增益变化范围为 $10^3 \sim 10^7$,
建立 R7400U 增益与 C4900 控制电压的线性关系,从
而压缩光电倍增管输出信号的动态范围 80dB,即实现
适用于水下无线光通信系统的 AGC 电路。

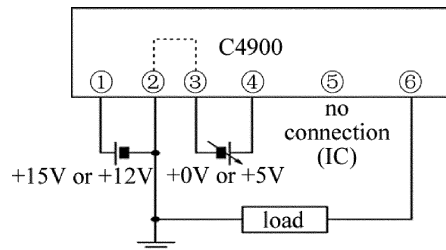


Fig. 4 Control of output voltage

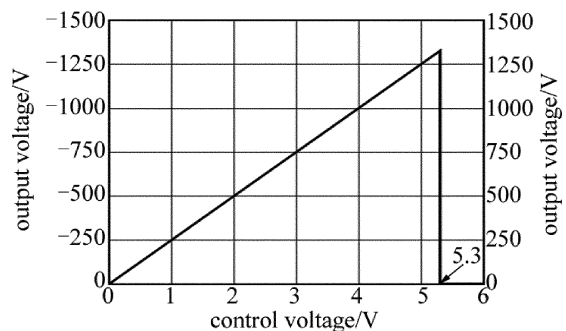


Fig. 5 Relationship of output voltage and control voltage

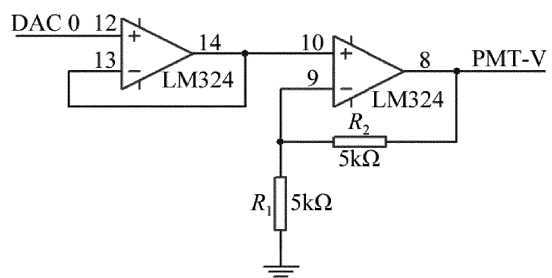


Fig. 6 Connection circuit of C4900 and digital control circuit

用电压控制 C4900 输出电压只需在数控电路数模转换器 (digital to analog converter, DAC) 输出端和 C4900 控制电压输入端加上放大器和合适的电阻就可以实现对 R7400U 增益的自动控制,如图 6 所示, PMT-V 代表 C4900 的控制电压,与 C4900 的④脚相连。

2.2 峰值采样/保持电路的实现

在模拟信号进行模数转换时,根据香农抽样定理,若有限带宽连续信号的最高频率为 f_c ,则必须保证抽样频率 f_s 满足:

$$f_s \geq 2f_c \quad (1)$$

但常规数模转换器 (analog to digital converter, ADC) 都没有这么高的工作频率。为了保证模数的转换精度,需要在模数转换前加一个峰值保持电路。本文中采用 LF398 实现峰值采样保持。LF398 是美国国家半导体公司研制的集成采样/保持器,它是一种反馈型采样/保持放大器,由场效应管构成,具有采样速率高、保持电压下降慢和精度高等优点。它只需外接一个保持电容就能完成采样保持功能,其采样保持控制端可直接与双极结型晶体管逻辑门电路 (transistor-transistor logic, TTL)、互补金属氧化物半导体数字集成电路 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 的逻辑电平相连。由 LF398 构成的峰值保持电路如图 7 所示,其由比较器 LM311、触发器 74LS74、与门 74LS08、峰值采样保持器 LF398 和必要的电阻、电容等构成^[9-10]。

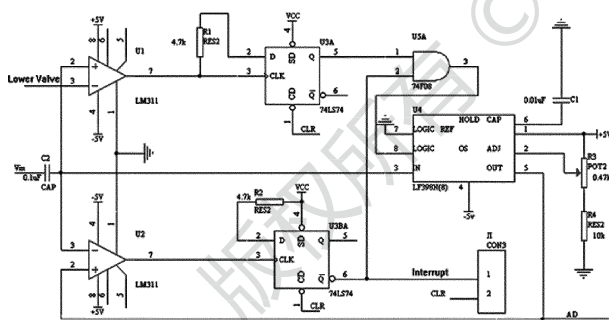


Fig. 7 Peak sampling/holding circuit

2.3 数字控制电路的实现

数字控制电路对峰值保持采样电路送来的信号进行处理,与内置数字参考信号进行比较,然后给高压模块电路发送合适的电压信号。通过 TMS320C54XX, MCS51 和 AtmegaXX 系列等常用芯片的速度、计算能力、存储容量、可靠性及开发难度的综合分析比较,最后选用 C8051F040 作为控制处理芯片。C8051F040 芯片集成了 ADC 和 DAC 模块,故它的引脚配置只需要考虑模拟信号的输入、输出,以及对峰值采样电路的时序控制,其它功能可以通过软件直接实现。完成的工作主要有:对输入进来的峰值保持信号进行模数转化,

与内置参考门限电压进行判断比较,根据设定的规则产生增益控制量并由 DAC 转化为控制电压送给高压模块控制端。本方案中需要实现的功能是把光电倍增管的输出信号动态范围压缩到一个设定范围内,显然不需要信号峰值的真实幅度,只需要判断信号峰值是否超过我们设定的一个信号峰值的范围,即使 ADC 饱和时也可以做正确的判断^[4,11]。

数字控制电路关键是程序,采用双门限步进算法产生高压模块电路的控制电压。程序实现的主要功能为:当 ADC 采样完成后就启动程序运行,设采样值为 U_s ,将其与程序中预先设定的上、下门限 U_h 和 U_l 进行比较;当 $U_s < U_l$ 时,控制 DAC 输出电压的字节步进单位长度;当 $U_s > U_l$,控制 DAC 输出电压的字节减小单位长度;如果采样值 U_s 满足 $U_l < U_s < U_h$,则相应的增益控制代码不变,在可控增益电压设定完成的同时,单片机给峰值采样保持电路发送复位电平,该过程重复进行,达到压缩光电倍增管输出信号动态范围的目的。图 8 为其程序运行流程图。

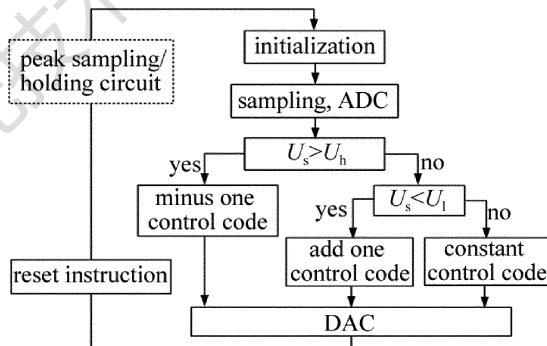


Fig. 8 Flow chart to run

3 AGC 电路用于无线 LED 光通信系统的实验研究

将无线光通信系统的发射端和接收端置于同一平面的同一条直线上,二者距离 4m,输出端接 1kΩ 的负载,用 SS4325 直流稳压电源为电路提供电源,用 Agilent 33250A 信号发生器发射方波信号加载在发射端的光信号上,用 Lecroy Wave Runner 6100A 示波器显示输出信号,同时用照度计测量接收端平面的照度大小。通过改变发射端和接收端对准角度或者利用衰减镜片来模拟光在水中的衰减幅度,实验示意图如图 9 所示。为防止噪声干扰,该实验在夜间无光源的情况下进行。

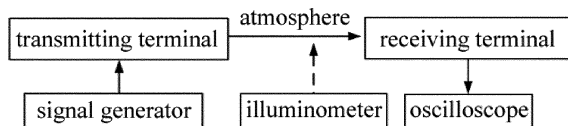


Fig. 9 Block diagram in the atmosphere

图 10 表示在不加载 AGC 电路时,信号发生器产生 50kHz,200kHz 的方波信号。当示波器显示信号峰值 500mV 左右时,用照度计测量的最大光照度值,当显示信号峰值 100mV 左右时,用照度计测量的最小光照度值。图 11 表示在加载 AGC 电路时,信号发生器发送 50kHz,200kHz 的方波信号。当示波器显示信号峰值 500mV 左右时,用照度计测量的最大光照度值;当显示信号峰值 100mV 左右时,用照度计测量的最小光照度值。实验中所用照度计为上海学联仪表厂的 ZDS-10W 型照度计,测量范围:0lx ~ 199.9klx,测量精度:±4%±1 个字,零点漂移:4h 内不大于 ±1 个字。

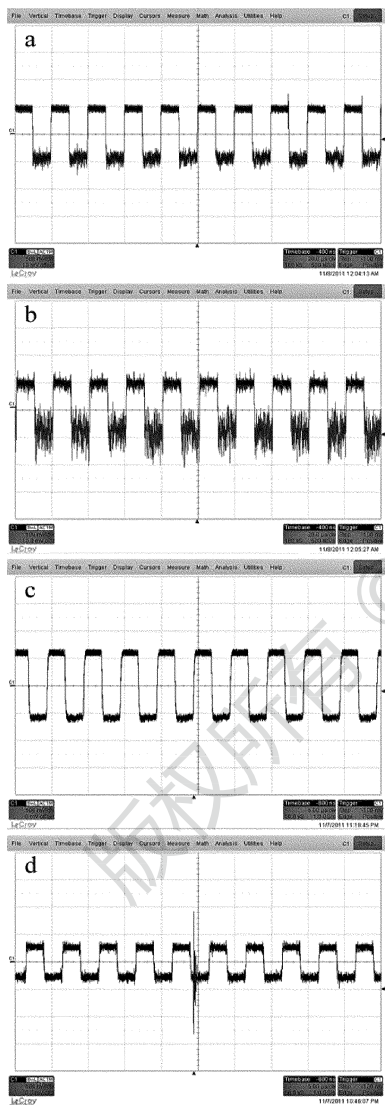


Fig. 10 Signal before loading AGC system
a—50kHz,38lx b—50kHz,3.2lx c—200kHz,30lx d—200kHz,3.1lx

通过对比图 10 和图 11 中最大和最小光照度值可发现,该 AGC 电路将水下无线光通信系统样机接收端信号的动态范围扩大了 40dB(-20dB ~ 20dB),表 2 中列出了这种前后变化。

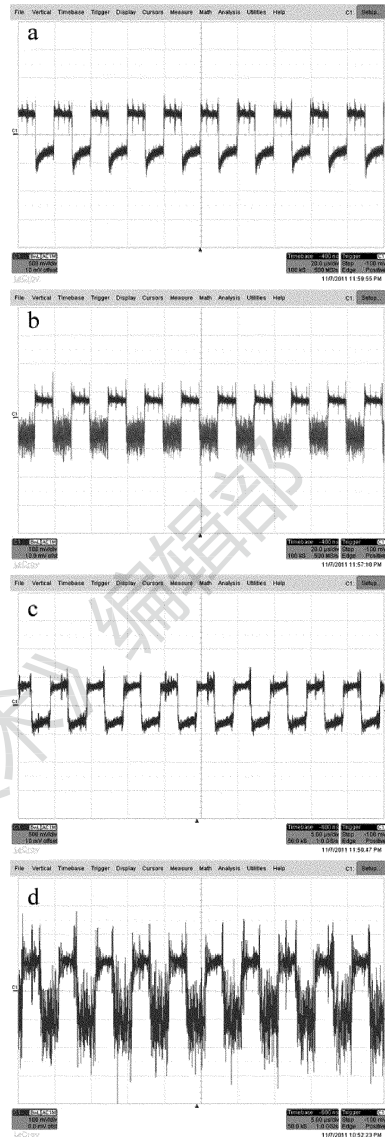


Fig. 11 Signal after loading AGC system
a—50kHz,300lx b—50kHz,0.2lx c—200kHz,290lx d—200kHz,0.3lx

Table 2 Contrast of maximum and minimum of illumination intensity

signal frequency	before loading AGC system		after loading AGC system	
	500mV maximum	100mV minimum	500mV maximum	100mV minimum
50kHz	38lx	3.2lx	300lx	0.2lx
200kHz	30lx	3.1lx	290lx	0.3lx

实验中 AGC 电路所处理的信号为 1kΩ 负载上的交流电压信号,所以在实验中设定上、下门限为 0.5V 和 0.1V。根据表 2 中的数据,可确定本文中所设计 AGC 电路满足实际应用前提下的压缩系数:

$$C = \frac{D_{in}}{D_{out}} = \frac{60}{20} = 3 \quad (2)$$

式中, $D_{in} = 20\lg 1000 = 60\text{dB}$, $D_{out} = 20\lg 10 = 20\text{dB}$ 。

而该 AGC 电路的真实响应时间无法直接测得,只

能根据电路最终的硬件组成确定一个理论值,对其作出估计。首先在峰值保持电路中,LM311 的响应时间为 200ns,74LS74 的响应时间为 20ns,74LS08 输出电平由高到低传输延迟时间为 20ns,LF398 收集采样信号时间为 10 μ s,所以峰值保持电路的理论响应时间为 10.24 μ s。数控电路的响应时间由 ADC 转换时间、DAC 转换时间、程序执行时间共同确定为 1ms,所以整个 AGC 电路的响应时间可估计为 1.1ms,上述值只能对真实值作出一定的估计,不能代替真实值。

4 结 论

在水下无线光通信系统中,利用光电倍增管增益可调的特性设计 AGC 电路,并将设计的 AGC 电路加载到水下无线光通信系统中进行了空气中的实验,结果表明:所设计的 AGC 电路能有效压缩水下无线光通信系统的输入信号动态范围,其压缩系数为 3,提高了水下无线光通信的有效范围。

参 考 文 献

[1] COCHENOUR M, LINDA J M. Optical propagation in the underwater environment [J]. Journal of Oceanic Engineering, 2008, 33(4): 513-521.
 [2] SUI M H. The key technology research on underwater wireless optical

communication systems [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009:10-31 (in Chinese).
 [3] WANG F, RAO J H. Realize variable gain amplifier in the underwater optical wireless communication system [J]. Laser Technology, 2012, 36(1): 99-102 (in Chinese).
 [4] ZHANG Zh G. 90dB wide dynamic range controllable agc system design and its application in radar remote measurement platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009:15-23 (in Chinese).
 [5] HAMAMATSU PHOTONICS K K. R7400 datasheet [EB/OL]. (2013-03-04) [2014-01-25]. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMT-handbook-v3aE.pdf.
 [6] CAI L Y, FANG Zh H, LI M X. Application of AGC technique[J]. Electrical Engineer, 2002, 28(24): 35-37 (in Chinese).
 [7] CAO P, FEI Y Ch. Design of a large dynamic range and broad band digital if AGC system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(5):613-616 (in Chinese).
 [8] HAMAMATSU PHOTONICS K K. C4900 datasheet [EB/OL]. (2012-11-07) [2014-01-25]. http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3004/3055/C4900/index.html.
 [9] HU X L, WENG D Sh, FENG Q, et al. A peak hold circuit for narrow pulse [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(1):42-45 (in Chinese).
 [10] HU Ch Y, XI H Q. A kind of practical pulse peak hold circuit[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(1):379-380 (in Chinese).
 [11] CHEN J J, ZENG X H, LI ZHENG R, et al. Design and realization of automatic gain control in electronic warfare[J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(1):77-80 (in Chinese).