

文章编号: 1001-3806(2012)01-0099-04

## 水下无线光通信系统中可变增益放大器的实现

汪锋, 饶炯辉\*

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: 为了减小水下无线光通信系统中接收信号的动态范围, 采用可变增益放大器, 论述了基于数字模拟转换器和数字电位器实现可控增益的两种方法, 并对基于数字电位器实现的方法进行了仿真实验。结果表明, 该方法能有效压缩信号的动态范围, 并使其趋于稳定。

关键词: 光通信; 可变增益放大器; 数字模拟转换器; 数字电位器; 动态范围

中图分类号: TN929.1; TN722 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.025

## Variable gain amplifiers in underwater optical wireless communication systems

WANG Feng, RAO Jiong-hui

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** A variable gain amplifier can be used to reduce the dynamic range of the received signal in an underwater optical wireless communication system. Two methods based on digital to analog converter and digital potentiometer, were discussed in detail. Both the methods can be used to control the amplification gain. Simulation was carried out for the method based on digital potentiometer. The results show that the signal dynamic range is effectively compressed and tends to be stable.

**Key words:** optical communication; variable gain amplifier; digital to analog converter; digital potentiometer; dynamic range

### 引言

水下无线光通信系统一般可应用于潜艇、无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)、蛙人等,但其工作距离随时发生改变,光接收与发射装置的对准角度随时发生改变,水体的衰减特性随时发生改变。因此,接收端得到的信号将在很大动态范围波动:当信号太强时接收装置的器件可能无法正常工作,而当信号太弱时又无法满足通信,强度的不断变化让通信断断续续<sup>[1-2]</sup>。一般在解决上述问题时,通过前置放大器处理输入的模拟信号,使其输出的模拟电压适合于模拟数字转换器(analog to digital converter, ADC)的电压范围,但是如果采用单一的增益放大,往往不能使ADC的精度最大限度地利用或致接收信号削顶饱和,造成大的误差,甚至损坏ADC。使用可变增益放大器就能很好地解决这些问题,不但压缩信号的动态范围使其不致饱和,还有效地提高了ADC的精度<sup>[3-4]</sup>。

作者简介:汪锋(1986-),男,硕士研究生,现主要从事水下光通信中信号处理的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: 13995523850@139.com

收稿日期:2011-05-18;收到修改稿日期:2011-05-26

### 1 基本原理

可变增益放大器的基本形式是由运算放大器和模拟开关控制的电阻网络组成,其基本原理如图1所示<sup>[4]</sup>。图中 $V$ 为电压, $R$ 为电阻, $S$ 为电子开关,下标 $o$ 表输出, $in$ 表输入, $r$ 表参考。模拟开关则由数字编码控制。数字编码可用数字硬件电路实现,也可用计算机硬件根据需要来控制。由图1可知放大器增益 $G$ 为:

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} \approx \frac{R_{fi}}{R_{in}} \quad (1)$$

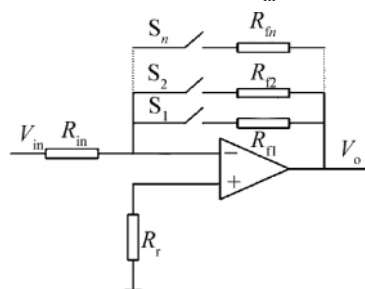


Fig. 1 Principle of variable gain amplifier

电路通过数字编码控制模拟开关切换不同的增益电阻,从而实现放大器增益的自动控制。

## 2 可变增益放大器的实现方式

最简单的可变增益放大器就是基于上述原理实现,其组成为运算放大器、电阻网络、电子开关。但该可变增益放大器具有漂移较大、输入阻抗不高、电路线路复杂等缺点。另外就是选择集成程控运算放大器,虽然随着半导体集成电路的发展,目前市面上有很多单片数字程控的增益放大器,例如 BURR-BROWN 公司的 PGA101 和 PGA206 等,它们虽然简单实用但由于只有几种固定的增益切换功能,很多时候不能满足实际需求。而水下光通信中增益控制必须具有良好的时效性、大的可调范围和很好的抗干扰能力<sup>[5-6]</sup>。

### 2.1 利用数字模拟转换器构成可变增益放大器

数字模拟转换器(digital to analog converter, DAC)内部有一组模拟开关的电阻网络,利用它代替运放反馈部件,与运算放大器一起组成可变增益放大衰减器,再配合判决功能模块就可实现整个系统的自动增益控制,而且其时效性好、增益可调范围大、性价比高。集成 DAC 转换器原理如图 2 所示。

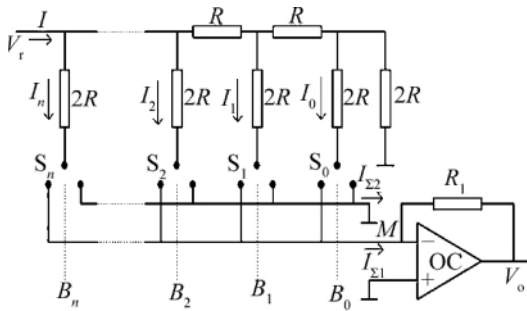


Fig. 2 Schematic diagram of a DAC

$V_t$  为参考电压  $S_0 \sim S_n$  是  $n$  个电子开关。 $B_0 \sim B_n$  是  $n$  位二进制数码,当  $B_i = 0$  时,开关  $S_i$  接地;当  $B_i = 1$  时,开关  $S_i$  向左边,并且流过第  $i$  条  $2R$  支路的电流为  $I_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ) 流向运放的总电流为  $I_{\Sigma 1}$ , 所以:

$$I_{\Sigma 1} = \sum_{i=0}^n I_i B_i \quad (2)$$

图 2 中 OC 为集成运算放大器,根据放大器的虚地概念,反相输入端  $M$  的电压  $V_M = 0$ 。有输出电压  $V_o = -I_{\Sigma 1} R_1$ , 则:

$$V_o = -R \sum_{i=0}^n I_i B_i \quad (3)$$

同理,由于同相端接地,所以整个电阻网络从  $V_t$  往右看的等效电阻为:

$R_{eq} = (((2R//2R + R)//2R + R)\dots)//2R = R$  故流入电阻网络的总电流为  $I = V_t/R$ , 而每条支路上的电流分别为:  $I_n = I/2, \dots, I_2 = I/2^{n-1}, I_1 = I/2^n, I_0 = I/2^{n+1}$ 。

故:

$$I_{\Sigma 1} = I_n B_n + \dots + I_2 B_2 + I_1 B_1 + I_0 B_0 = I(B_n 2^n + \dots + B_2 2^2 + B_1 2^1 + B_0 2^0) / 2^{n+1} = V_t Z_B / (2^{n+1} R) \quad (4)$$

式中  $Z_B = B_n 2^n + \dots + B_2 2^2 + B_1 2^1 + B_0 2^0$ , 所以运算放大器的输出:

$$V_o = -V_t R_1 Z_B / (2^{n+1} R) \quad (5)$$

由(1)式可知,只要电阻  $R_{fi}$  和  $R_{in}$  单独或者同时改变就可以达到改变增益的目的。而 DAC 中含有电阻网络和数字开关,利用它实现  $R_{fi}$  和  $R_{in}$  的改变是很容易的事情<sup>[7]</sup>。把可变增益放大衰减器的输入输出电压分别作为两片 DAC 的参考电压,具体构成见图 3。

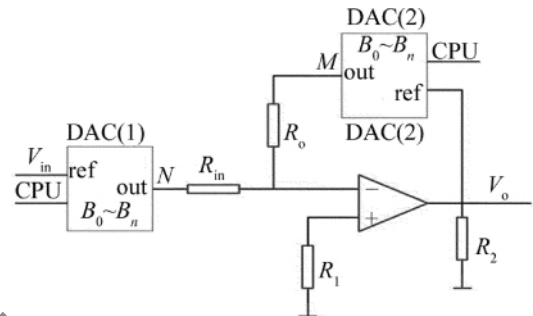


Fig. 3 Variable gain amplifier composed of DAC

由(5)式可知:  $M$  端的电压  $V_M = -V_o R_1 Z_{B_2} / (2^{n+1} R)$ ,  $N$  端的电压  $V_N = -V_{in} R_1 Z_{B_1} / (2^{n+1} R)$ , 其中  $Z_{B_2}$  和  $Z_{B_1}$  分别代表两片 DAC 的数字量输入,  $V_{in}$  为输入电压,  $V_o$  为输出电压,由运放的虚地概念知道流过  $R_{in}$  和  $R_o$  的电流相等, 所以有:

$$V_M / R_o = V_N / R_{in} \quad (6)$$

将  $V_M$  和  $V_N$  值带入(6)式,得:

$$V_o Z_{B_2} / R_o = V_{in} Z_{B_1} / R_{in}$$

故图 3 所示的可变增益放大器的增益为:

$$A = V_o / V_{in} = (R_o / R_{in}) (Z_{B_1} / Z_{B_2}) \quad (7)$$

由(7)式可知,通过对  $Z_{B_2}$  和  $Z_{B_1}$  的设置可以实现放大器的增益可变,即只需选择出合适的 DAC 就可构成适用于水下光通信的可变增益放大器。

### 2.2 利用数字电位器实现可变增益放大器

数字电位器是一种具有数字接口的有源器件,与单片机等微控器件联接可精确调控其阻值。用它替代机械电位器可有效克服使用机械电位器出现的噪音、振动等现象。故可用数字电位器代替(1)式中的  $R_{fi}$  和  $R_{in}$  构成可变增益放大器,其调节级数多,基本实现增益连续可调,对于不同强弱的信号总能找到匹配的放大倍数,而且它还与机械滑动变阻器的连续逐级调节不同,可以实行越级变换,通过微处理器控制更精确便捷。以美国 Xicor 公司推出的 X9C 系列电位器为例介绍数字电位器的工作原理。从电路上看,如图 4 所示, X9C 系列电位器由两大部分组

成,一部分是数字控制电路,一部分是电阻网络。它是通过改变电阻网络的接点方式来改变电阻值。数字控制部分的存储器是一种掉电不挥发存储器。X9C 系列数字电位器的各个端口的具体功能介绍如下: U/D 为控制计数方向的输入信号,高电平时,为加计数,低电平时为减计数; INC 为计数脉冲输入,在脉冲的下降沿触发计数; CS 为片选信号输入,低电平时,计数器接收脉冲并计数,高电平时,计数器不工作而维持当前输出,此时电位器被锁定;  $R_h/V_h$  和  $R_l/V_l$  为电位器的两个端点,其允许外接电压最高为 5V,最低为 -5V;  $R_w/V_w$  为电位器中间抽头。

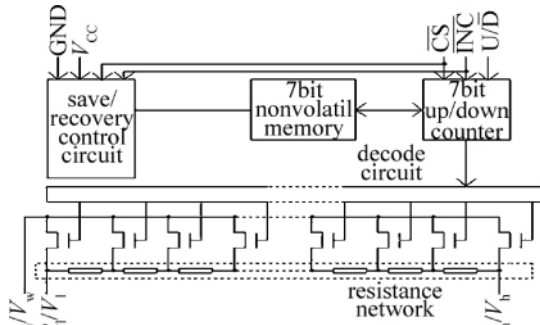


Fig. 4 Internal structure of X9C series potentiometer

图 4 所示的数字电位器含有一个 99 个电阻单元组成的电阻阵列,每两个电阻单元之间和两个端点都有可以被滑动端访问的抽头,滑动单元的位置由 CS, U/D 和 INC 3 个输入端的输入信号控制,滑动单元的位置可以被储存在非易失性存储器中,使用方便简单。在具体电路设计上,采用两片数字电位器 X9C104 代替 (1) 式中的  $R_{fi}$  和  $R_{in}$ ,电路原理图见图 5。片选信号端口 CS 和两个控制信号端口 U/D 和 INC 的信号由微控器件(单片机或者 DSP 等)控制,则可设 X9C104(1) 和 X9C104(2) 通过微控器件控制后的阻值分别为  $R_{R1}$  和  $R_{R2}$ ,则由图 5 可知其放大增益 A 为:

$$A = - \frac{R_2 + R_{R2}}{R_1 + R_{R1}} \quad (8)$$

式中  $R_{R1}$  和  $R_{R2}$  是可调的,通过微控器调节  $R_{R1}$  和  $R_{R2}$  的值可实现 A 的可调<sup>[7-9]</sup>。

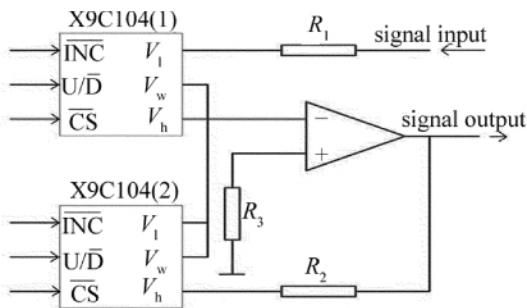


Fig. 5 A variable gain amplifier composed of digital potentiometer

### 3 仿真实验

在 Multisim 中以数字电位器实现法为例进行仿真验证。如图 6 所示,两片数字电位器 X9C104,两片运

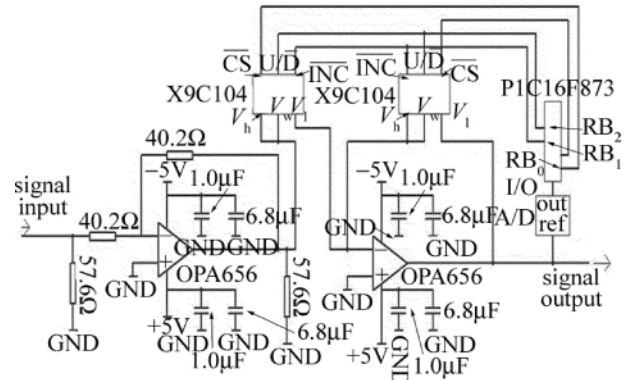


Fig. 6 Principle diagram of simulation experiment

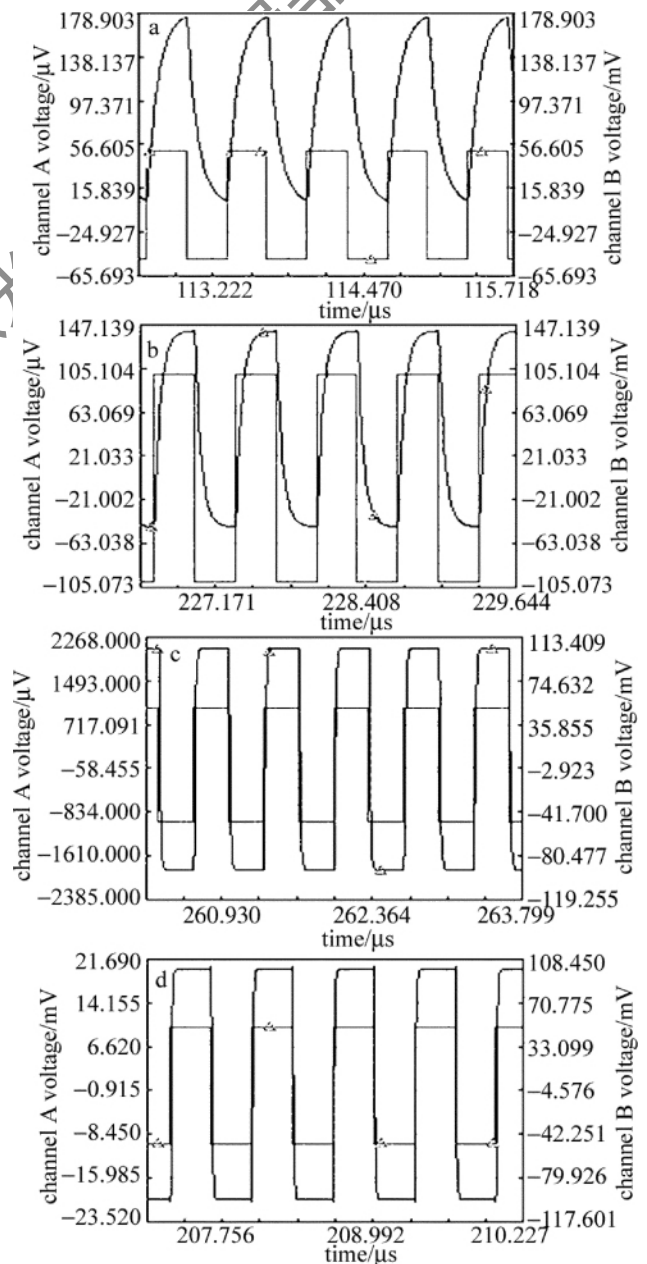


Fig. 7 Simulation results

算放大器 OPA656, 微处理器 PIC16F873, 若干电容、电阻组成两级放大电路。当光电倍增管的输出信号先进入初级放大电路的反相输入端, 经初级放大后再进入次级放大电路, 次级放大电路的反向输入端和输出端分别接数字电位器的  $M$  端和  $L$  端。输出信号分两路, 一路接入下级电路, 一路接入电压比较器, 比较器的输出端接微处理器 PIC16F873 的 I/O, 通过 ADC 采样判断输出电压是否超出上下门限的范围, 数字电位器的片选信号端口 CS 和控制信号端口 U/D, INC 与微处理器 SPI 口连接, 完成  $W$  的位置变换, 实现增益调节<sup>[9-12]</sup>。

微处理器通过编程主要实现功能: 采样两个比较器的输出, 判断是否进行增益调节; 选择相匹配的增益; 向数字电位器写入增益调节代码, 该过程循环直至符合要求。

改变输入信号的幅值观察响应曲线。图 7 为输入频率为 1.5 MHz, 幅值分别为 0.05 mV, 0.1 mV, 1 mV, 10 mV 的矩形波信号图。图 7 中, channel A 为输入信号, channel B 为输出信号。从仿真图形可看出幅值相差 200 倍的信号源, 响应信号幅值被可变增益放大器很好地控制在 0.09 V ~ 0.11 V 之间<sup>[13-14]</sup>。

#### 4 结束语

由可控增益放大器原理入手, 主要论述了两种实现可控增益放大器的方法, 并以具体例子仿真验证基于数字电位器实现的方法, 很好地实现了对信号动态范围的压缩。该方法能很好地适用于水下光通信系统, 既减小接收信号的动态范围, 又有效提高了 ADC 的精度。但是两种方法在不同的应用环境实现难度不一样, 实际应用时应综合考虑器件、环境等各种因素, 以达到最优效果。

(上接第 92 页)

[5] MOHAMMAD-NEJAD S, ALIRAMEZANI M, POURMAHYABADI M. A novel all-solid photonic bandgap fiber with ultra-low confinement loss[J]. Iran University of Science and Technology, 2009, 1(1): 268-269.

[6] ROBERTS P J, COUNY F, SABERT H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2005, 13(1): 236-244.

[7] WEST J, SMITH C, BORRELLI N, *et al.* Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. Optics Express, 2004, 12(18): 1485-1496.

[8] LUAN F, GEORGE A K, HEDLEY T D, *et al.* All-solid photonic bandgap fiber[J]. Optics Letters, 2004, 29(20): 2369-2371.

#### 参 考 文 献

- [1] CHANCEY M A. Short range underwater optical communication links [D]. Raleigh, North Carolina, USA: North Carolina State University, 2005: 2-24.
- [2] DENG R, RAO J H, ZHANG X H, *et al.* Convocational code design avoiding malignant codes in underwater optical communication systems [J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 222-225 (in Chinese).
- [3] HUANG X Sh, WANG R L, XU R Sh, *et al.* The transmitting and receiving system for underwater laser communication [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(4): 651-656 (in Chinese).
- [4] WANG J D. Design of a digital automatic gain controller used for communication receivers [J]. Avionics Technology, 2010, 41(1): 37-40 (in Chinese).
- [5] LIU Ch X, FU Y T. Gain-programmed amplifier based on AD8402 digital potentiometer [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(7): 1458-1461 (in Chinese).
- [6] LI D. Research and design of variable gain amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009: 15-37 (in Chinese).
- [7] XI Y H. Realization of programmable gain amplifier [J]. Information Technology, 2009, 33(9): 24-25 (in Chinese).
- [8] STOJANOVIC V, KUPFER T. On the design of AGC circuits in IM-DD NRZ optical transmission systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(20): 3426-3432.
- [9] CHENG Y B, LI Q, LIU Sh Q. A novel design for laser orientation detection system [J]. Laser Technology, 2005, 29(5): 538-540 (in Chinese).
- [10] FENG Y, ZHANG H. Variable-gain control base on digital potentiometer for laser receiving circuit [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(4): 9-13 (in Chinese).
- [11] CHEN J Y, YI X S. Time in terval measurement of laser ranging based on CPLD & microchip [J]. Laser Technology, 2008, 33(4): 363-365 (in Chinese).
- [12] TAN Zh Q, LONG X W. Design of driving circuits of semiconductor lasers for measurement of continuous-wave cavity ring-down technology [J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 27-30 (in Chinese).
- [13] CHEN B L, ZHANG H, JI T G. The laser proximity fuze based on the AGC [J]. Laser Journal, 2004, 25(1): 72-73 (in Chinese).
- [14] ZHANG X J, ZHANG H, CHEN B L. Methods of improving the precision of laser proximity fuze with laser pulse-phase detecting system [J]. Journal of Detection & Control, 2007, 29(2): 77-80 (in Chinese).
- [9] BÉROURNÉ A, PUREUR V, BOUWMANS G, *et al.* Solid photonic bandgap fiber assisted by an extra air-cladding structure for low-loss operation around 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. Optics Express, 2007, 15(2): 316-324.
- [10] SHI Q, KAI G Y, WANG Zh *et al.* Properties of all-solid square-lattice photonic bandgap fibres [J]. Chinese Physics Letter, 2007, 24(8): 2259-2262.
- [11] ZHAN Y, LI X Z, ZHENG Y. Analysis of dispersion characteristics of photonic crystal fibers [J]. Laser Technology, 2009, 33(1): 24-25 (in Chinese).
- [12] ZHAO Ch F, LU X, LUO Sh P. Numerical analysis of quasi-soliton propagation using dispersion compensation [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 15-16 (in Chinese).