

一种低电压、低噪声、低失真度的语音信号自动增益控制电路

王明轩, 李冬梅

(清华大学 电子工程系, 北京 100084)

摘 要: 提出了一种工作在低电压下的宽动态范围、低噪声、低失真度的可用于语音信号采集系统的自动增益控制电路(AGC). 该 AGC 环路采用反馈式结构, 数字式增益控制. 设计指标为 1 V 工作电压, 0~40 dB 增益动态范围, 2 dB 增益步长, 8 kHz 带宽. 采用 π 型电阻网络作为环路中可变增益放大器的无源反馈网络, 提高增益的准确性并实现增益在对数单位下的线性. 采用滞回比较器来减弱当峰值检测器输出信号在阈值电压附近小幅度快速变化而引起的抖动. 基于 UMC180 nm CMOS 工艺完成电路及版图设计, 芯片面积约为 0.45 mm². 提取版图寄生参数后的电路仿真结果显示, AGC 环路的功耗在 1 V 工作电压下约为 0.17 mW; AGC 的增益动态范围为 0~40.2 dB, 增益步长为 2 dB, 增益误差不大于 0.2 dB. 总谐波失真在输出信号 1 kHz, 峰峰值为 0.4 V 时小于 -70 dB. AGC 中可变增益放大器单位增益时, 在音频(0.02~20 kHz)范围内的输出积分噪声小于 5 μ V_{RMS}.

关键词: 自动增益控制; 语音信号采集; 数字式增益控制; π 型电阻网络; 低噪声; 低失真

中图分类号: TN432

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)11-0114-05

A Low Noise Low Distortion Automatic Gain Control Circuit

WANG Ming-xuan, LI Dong-mei

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper presents a kind of Automatic Gain Control (AGC) circuits which can be used in speech signal acquisition system, it has high gain range, low noise and high linearity. The proposed AGC is based on feedback topologies and the gain is digital controlled. The design indexes are 1 V supply voltage, 0~40 dB gain range, 2 dB gain step, 8 kHz bandwidth. A π -type resistors network is used in the Programmable Gain Amplifier (PGA) as the passive feedback device to realize gain linearity in decibels and increase the gain accuracy. The hysteresis comparator eliminate the chattering effects when the output signal of Peak Detector changes rapidly around the threshold. The design is implemented in 0.18 μ m CMOS and occupies an active area of 0.41 mm². The power consumption of AGC is about 0.17 mW at 1 V supply voltage. The gain of AGC loop ranges from 0 dB to 40.2 dB in 2 dB step with gain error not more than 0.2 dB. The total harmonic distortion (THD) is below -70 dB over the audio frequencies at 1 kHz, 0.4-V_{pp} differential output. The integrated noise in the audio range (20 Hz~20 kHz) is less than 5 μ V_{RMS} when the gain of PGA is set at 0 dB.

Key words: AGC; speech signal acquisition; digital control loop; π -type resistor network; low noise; low distortion

1 引言

语音信号采集模块作为语音信号处理系统的前端必不可少, 典型的语音信号采集系统通常包括两个部分: 前置固定增益或自动增益控制的放大电路和模数转换器(ADC), 图 1 给出一种由 AGC 和

ADC 组合的语音信号采集系统. 语音信号经由麦克风转化产生的电压信号幅度变化很大, 固定增益预放大电路能够提高小信号的幅度, 但不能缩小 ADC 所需处理信号的动态范围, 而大动态范围的 ADC 功耗和结构复杂度都较高. 自动增益控制放大电路能够将幅度变化很大的信号放大为幅度变化范围较

收稿日期: 2016-02-26; **修回日期:** 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61171001); 深圳市知识创新计划项目(JCYJ20140419122040609)

小的信号,从而降低对 ADC 的动态范围的要求. 小尺寸和低功耗是便携设备的一般要求;而针对语音信号,噪声和线性度也是重要的技术指标. 本文提出了一种数字增益控制的反馈结构的自动增益控制放大电路. 利用 π 型电阻网络准确设定增益实现增益在对数单位下线性变化;采用多种低噪声和抑制失真的技术和电路模块实现了 $0\sim 40$ dB 动态范围,2 dB 增益步长,音频(0.02~20 kHz)范围输入等效噪声小于 $5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$,总谐波失真小于 -70 dB 的低功耗自动增益控制放大电路.

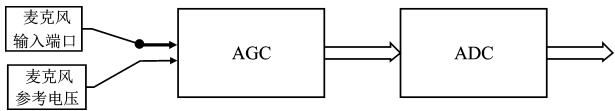


图1 语音信号采集系统框图

2 自动增益控制放大电路设计

自动增益控制环路根据检测模块所选择的输入信号在环路中的不同位置可以分为反馈型和前馈型,如图2(a)、(b)所示. 反馈型有两个主要的优点:减小对包络检测器的动态范围的要求;反馈电路结构能够将失真减小环路增益的倍数,从而提高电路的线性度^[1].

另一方面,AGC 根据增益控制电路的性质又可以分为数字增益控制和模拟增益控制两种类型. 模拟增益控制利用 MOS 管的指数特性;数字式的增益控制将信号转换成控制信号位后再对可变增益放大器进行控制,更加灵活,同时能够降低电路复杂度. 本文选择了数字增益控制的反馈型 AGC 电路结构,如图2(c)所示.

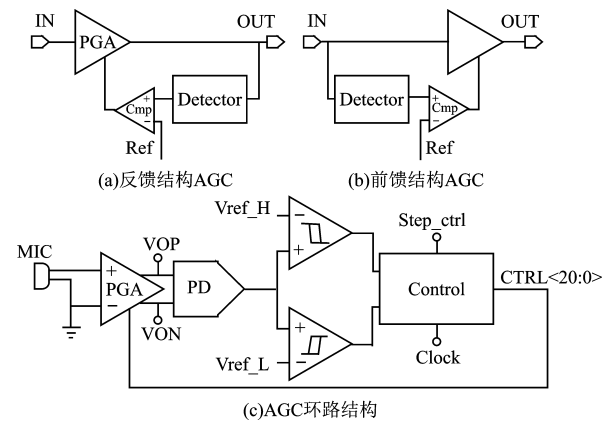


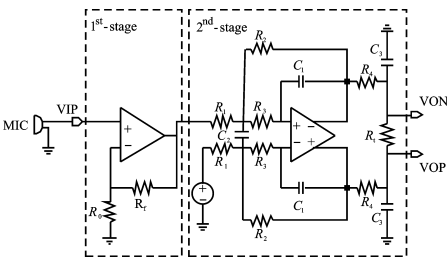
图2 反馈结构 AGC、前馈结构 AGC 及 AGC 环路结构

2.1 增益可配置放大器

作为 AGC 环路中的关键模块之一,增益可配

置放大器(PGA)的设计直接影响了电路的增益特性. 为了能够为幅度变化范围很大的信号提供适当的增益,PGA 需要较大的增益动态范围. 因此本文中 PGA 最大增益设定为 40 dB. 考虑到当应用范围扩展至幅度较大的信号时,需要较小的增益,所以增益范围覆盖到单位增益(0 dB). 另外,在实际应用中,数字控制的 AGC 环路会在增益切换的过程中引入短时脉冲干扰. 但是根据研究表明通过减小 AGC 的增益步长能够减小这种干扰,然而减小增益步长会增加电路结构复杂程度^[2]. 因此,本文中的 PGA 设计为 $0\sim 40$ dB 的增益范围,增益步长为 2 dB,增益误差不大于 0.2 dB. 同时,噪声和线性度是 PGA 需要重点考虑的问题,在电路技术和晶体管尺寸选择方面均考虑到了噪声和线性度的要求.

本文提出的 PGA 的结构如图3所示,分为两个部分:第一部分提供 $0\sim 40$ dB 可变的电压增益;第二部分具有低通滤波器的功能,同时也作为 AGC 与 ADC 之间的连接级.



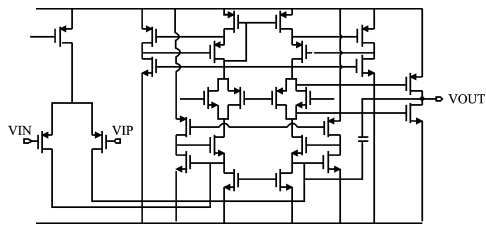


图4 带增益提升的两级密勒补偿运放

第二部分是利用全差分放大器构成的多重反馈结构的低通滤波器,用来滤除 ADC 输入端信号的带外噪声,同时作为 ADC 与 AGC 之间的连接级.利用全差分结构有效地抑制二阶失真^[3],多重反馈的在二阶低通滤波器的传输函数中实现复极点.根据滤波器的结构计算其带宽为^[4]

$$BW = \frac{1}{2\pi \sqrt{2 \times R_2 R_3 C_1 C_2}} \quad (2)$$

作为 AGC 与 ADC 的连接级 R_4 阻止 ADC 的输入对 AGC 产生影响; C_3 能够减弱 ADC 输入端的电荷注入,而 R_4 和 C_3 所构成的实极点设定在信号频带之外,不会对带内信号造成影响.第二部分中为了减小由于输入晶体管失配而产生的失调电压对电路产生的影响,加入了直流失调消除(DCOC)电路如图 5 所示.

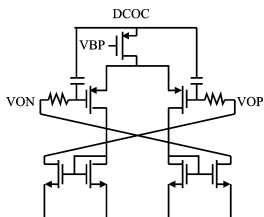


图5 直流失调消除(DCOC)电路

2.2 峰值检测模块(PD)

峰值检测模块(PD)的功能是提取信号的包络,为比较器提供信号幅度的信息.不同于通常的峰值检测电路对信号峰值进行采样并保持,直到出现更大的峰值或复位.为了得到信号的包络特性,文中所设计的 PD 需要有适当比例的充电电流和放电电流;还应考虑到 PGA 增益控制的需求.实际的语音信号常有类似图 6(a)的时域波形,为了满足需求,设计 PD 模块的包络检测特性如图 6(b)所示.

传统峰值检测电路通常包括误差放大器、MOS 二极管和电容.本文中设计的峰值检测器用电流镜代替 MOS 二极管.通过设定对电容的充电电流和放电电流的值,使得 PD 的检测特性达到要求.

为了避免检测所得包络与参考电压比较的过程中由于信号小幅度快速地在阈值电压附近变化导致比较结果在 0 和 1 之间快速切换,在 PD 之后加入

滞回比较器并设置适当的滞回电压.

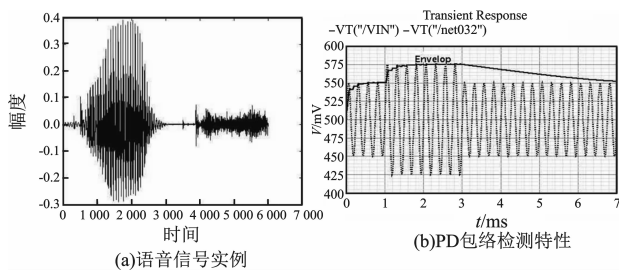


图6 语音信号实例与 PD 包络检测特性

2.3 数字增益控制模块

数字增益控制模块的结构如图 7 所示,输入信号为 AGC 环路中两个滞回比较器的输出信号.记为 $S<1:0>$,分别表示与较低的参考电压 V_{ref_L} 的比较结果和较高的参考电压 V_{ref_H} 的比较结果.经过控制状态生成模块得到 5 位(21 个增益状态至少需要 5 个位表示)的控制字 $Q<4:0>$.控制字通过状态-开关映射模块转换为相应的开关控制信号.以控制字 00001 为例,此时映射结果只有 $Switch<1>$ 为 1, $Switch$ 的其余位均为零;其中映射模块通过化简卡诺图采用最少的逻辑门构成.

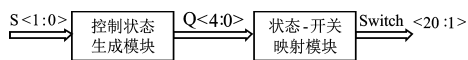


图7 数字增益控制模块结构

控制状态生成模块状态转移过程是:如果 $S<1:0>$ 为 00,输出的结果小于两个参考电压则表明幅度较小, $Q<4:0>$ 加 1;如果 $S<1:0>$ 为 11,输出的结果大于两个参考电压,则表明幅度较大, $Q<4:0>$ 减 1;如果 $S<1:0>$ 为 01,输出的结果介于两个参考电压之间,则表明幅度适当, $Q<4:0>$ 保持不变.

另外,为了防止信号幅度过大,即增益为 0 dB 仍超出参考电压范围,或者信号幅度过小,即增益为 40 dB 仍小于参考电压,对数字增益加入额外的边界条件控制逻辑,使得当出现上述两种情况时增益不再变化,如图 8 所示.

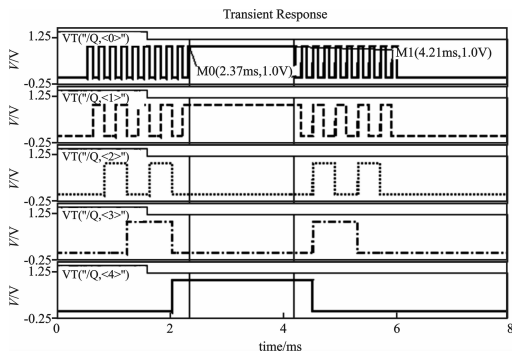


图8 增益控制的特殊情形

2.4 开关控制的 π 型电阻网络

控制信号实现对 PGA 增益的控制,最终需要通过控制 PGA 中的无源反馈网络. 为了得到精确的增益并实现对数线性的增益变化,本设计采用了开关控制的 π 型电阻网络作为 PGA 的反馈网络. 如图 9 所示.

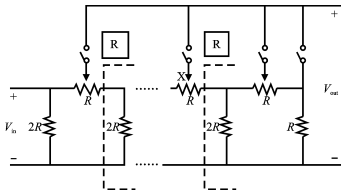


图 9 π 型电阻网络

假设电阻网络实现的反馈因子为 H ,那么当环路增益足够大时,闭环增益近似由式(3)计算得出:

A_c = \frac{A_o}{1 + A_o H} \approx \frac{1}{H} (A_o \gg 1) \tag{3}

按照图中所示的电阻连接关系和阻值,当开关分别连接在每个横向的电阻两端时电路增益的比例为 6 dB. 因此,如果能够将横向的电阻设定为适当的值就能够得到 2 dB 的增益步长.

设相邻的两个开关分别闭合时对应的反馈因子分别为 H_k 和 H_{k+1} , G_{k+1} 表示两个增益对数单位下的差值:

G_{k,k+1} = 20 \lg \left(\frac{H_k}{H_{k+1}} \right) \tag{4}

根据电阻网络的阻值和连接关系可得:

\frac{H_{k+1}}{H_k} = \frac{R - X + R}{2R} (0 \leq X \leq R) \tag{5}

因此,分别设定 X 为 $0.73R$ 和 $0.4R$ 时就能够得到 2 dB 的增益步长.

3 版图设计及仿真结果

本设计基于 UMC 180 nm 1P6M CMOS 工艺完成版图设计. 为了防止数字电路部分对模拟电路部分产生干扰,需将二者进行隔离;电路中差分结构在版图中对称放置,尽量保持差分信号线相邻且长度和周围环境尽可能一致;采用较高层的金属可减少与衬底产生的寄生电容对电路性能的影响;优化关键路径的布线长度;在匹配要求较高的器件周围添加冗余器件以实现器件周围环境的一致. π 型电阻网络的版图设计采用了根器件方法,以提高电阻之间比值的精确度^[5-6]. 由 AGC 和 16 位 $\Sigma\Delta$ ADC^[7]构成的版图如图 10 所示,其中 AGC 的总面积约为 0.45 mm^2 .

对版图提取寄生参数后对 AGC 环路及其中关键模块进行后仿真. 通过设定不同的增益控制字得到



图 10 语音采集系统 (AGC 加 ADC) 版图
PGA 的不同增益如图 11 所示,最大误差为 0.2 dB,可以看出增益在对数单位下呈现出较好的线性.

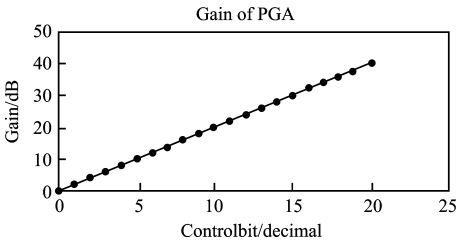


图 11 PGA 增益随控制状态变化曲线
PGA 主要性能总结如表 1 所示.

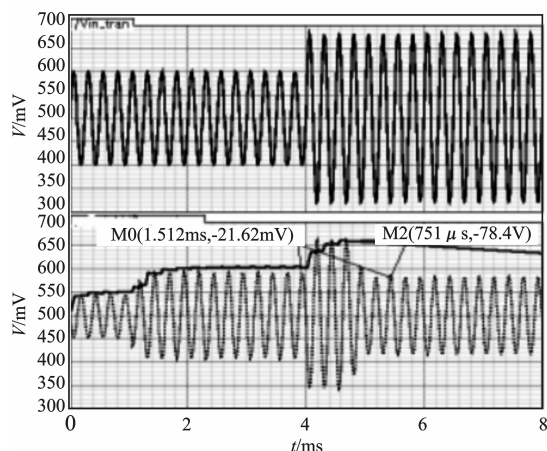
表 1 PGA 性能总结

性能项目	性能指标
工艺	0.18 μm CMOS
工作电压/V	1
输入等效噪声电压(μV_{rms})	2.28 (0.02~20 kHz)
增益范围和增益步长/dB	0~40, 2
增益误差/dB	≤ 0.2
总谐波失真/dB	-70 (@0.4V _{pp} Output @1kHz)
面积/ mm^2	0.075

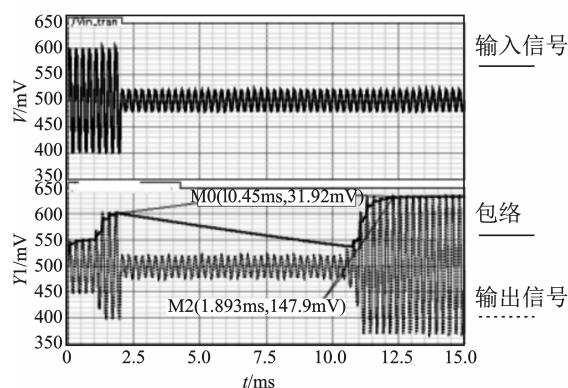
采用阶跃信号作为包络的幅度调制正弦信号作为输入信号,测试 AGC 环路的增益控制特性,其中正弦信号的频率为 4 kHz. 当幅度迅速上升时,如图 12(a)所示,AGC 将增益减小直至幅度稳定的时间称为 attack time,其值约为 1.5 ms. 当幅度迅速下降时,如图 12(b)所示,AGC 将增益增大直至幅度稳定的时间称为 decay time,其值约为 10.5 ms. 上升时间和下降时间所对应的频率大约在几百赫兹的量级,对于语音信号一般认为在 10~30 ms 内特性基本上不变,也就是短时平稳特性^[8-9],因此 AGC 环路的增益控制特性符合语音信号的特点.

4 结束语

本文设计了一种能够用于音频信号采集系统的增益范围为 0~40 dB、增益步长为 2 dB 的,低噪声、高线性度的自动增益控制放大电路 (AGC). 采用反馈结构,数字增益控制实现 AGC 环路;利用 π 型电阻网络准确设定增益并实现对数单位下增益线性变化. 基于 UMC180 nm CMOS 工艺进行电路及版图的设计,并对电路进行后仿真. 仿真结果显示增益误差小于 0.2 dB,



(a)信号幅度变大



(b)信号幅度变小

图 12 信号幅度变化示意图

PGA 设定为单位增益时等效输入噪声小于 $5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$, 总谐波失真(THD)在输出峰峰值为 0.4V 时小于 -70dB . AGC 环路增益控制的上升时间和下降时间分别约为 1.5ms 和 10.5ms , 适合语音信号的包络变化特点. 在 1V 的工作电压下, AGC 环路的功耗约为 0.17mW .

(上接第 113 页)

- [3] Yang C, Tian S, Liu Z, et al. Fault Modeling on Complex Plane and Tolerance Handling Methods for Analog Circuits[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2013, 62(11): 2730-2738.
- [4] 张朝龙, 何怡刚, 袁莉芬, 等. 基于核熵成分分析的模拟电路早期故障诊断方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 675-683.
- [5] 刘美容, 张立玮. 基于小波分解和模糊聚类的模拟电路软故障诊断[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(12): 140-143.
- [6] 许军, 张耀辉, 陈圣俭. 基于结点电压增量的模拟电路多故障诊断方法研究[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(2): 138-141.

参考文献:

- [1] Alegre Pérez J P, Celma Pueyo S, Calvo López B. Automatic Gain Control[M]. Belin: Springer, 2011: 13-15.
- [2] Haerizadeh S, Jorgensen I H H, Marker-Villumsen N, et al. Investigation of an AGC for audio applications[C]// Ph D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 2015 11th Conference on. Monterey: IEEE, 2015: 145-148.
- [3] Willy M C Sansen, Analog Design Essentials[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [4] Karki J. Fully differential amplifiers Analog Applications Journal, Texas Instruments[R]. Belin; 2000: 38-41.
- [5] Silva-Martinez J, Salcedo-Suner J. A CMOS automatic gain control for hearing aid devices[C]// Circuits and Systems, 1998. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on. JLASOW; IEEE, 1998: 297-300.
- [6] Saint Judy, Saint Christopher. IC Mask Design[M]. NY: McGraw-Hill Professional, 2002: 97-120.
- [7] 陈良栋. 低电压低功耗 16 bit 音频 $\Delta\Sigma$ ADC 的研究与实现[D]. 北京: 清华大学, 2001: 31-70.
- [8] 赵力. 语音信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 10-30.
- [9] 王明轩. 高精度低功耗语音信号采集系统芯片设计关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

作者简介:

王明轩 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为数模混合电路设计. E-mail: sdwmx866@163.com.

李冬梅 女, (1966-), 副教授, 博士. 研究方向为模拟及数模混合集成电路设计、SOC 集成电路设计、语音信号处理 SoC 芯片关键技术.

- [7] Z Li. A Novel Fault Diagnostic Method Based on Node-Voltage Vector Ambiguity Sets[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2014, 63(8): 1957-1965.
- [8] Wilkinson J H. The algebraic eigenvalue problem[M]. Oxford: Clarendon, 1988: 62-64.
- [9] Kaminska B, Arabi K, Bell I. Analog and mixed-signal benchmark circuits—First release[C]// Proc ITC. Washington, DC: IEEE, 1997: 183-190.

作者简介:

周启忠 男, (1976-), 副教授. 研究方向模拟电路故障诊断. E-mail: zhouxu0813163.com.

谢永乐 男, (1969-), 教授. 研究方向模拟电路故障诊断、系统可靠性设计.