

# 一种改进的数字 AGC 系统设计与仿真

姜 坤, 王元钦, 赵成斌

装备学院测控工程研究中心, 北京 101416

**摘要** 针对传统自动增益控制 (AGC) 系统稳定时间和控制精度相互关联又彼此矛盾的问题, 基于反馈式对数 AGC 环路, 提出一种输出精度可控、稳定时间可调的数字 AGC 系统。通过对环路增益因子的巧妙拆分, 实现了稳定时间和控制精度的独立可控。推导了 AGC 环路方程, 求解了时间常数和控制精度的解析表达式, 分析了低信噪比条件下功率估计方法的性能。采用平方和功率估计法对 AGC 系统进行了计算机仿真。仿真结果表明, 该系统环路稳定时间不随输入信号幅度的改变而改变, 可根据实际工程需求, 对稳定时间和控制精度进行调节, 在低信噪比下也具有优良的性能。

**关键词** 数字自动增益控制; 稳定时间; 控制精度; 功率估计

**中图分类号** TP273

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.33.006

## Design and Simulation of an Improved Digital AGC System

JIANG Kun, WANG Yuanqin, ZHAO Chengbin

TT&C Research Center, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

**Abstract** A new digital AGC system with independent adjustable control accuracy and settling time is proposed based on feedback logarithmic AGC loop for the conflicting issues between control accuracy and settling time in traditional AGC system. By smartly splitting the single loop gain factor to two independent loop gain factor, one is used to control steady-state accuracy, the other is used to control settling time, the independent adjustment of settling time and control accuracy is achieved. AGC loop equation is derived. Analytical expression of time constant and control accuracy is solved. Performance of the power estimation methods between sum of squares and maximal values of slip windows are analyzed in low SNR, which indicates that sum of squares power estimation method has better performance in low SNR. The computer simulations of the AGC system are given using sum of squares power estimation method. The results indicate that the settling time of the system don't change with the input signal amplitude, the settling time and control accuracy can be adjusted according to the actual engineering requirements, the system has excellent performance even in low SNR.

**Keywords** digital automatic gain control; settling time; control accuracy; power estimation

### 0 引言

测控信号微弱, 动态范围大, 信噪比低。由文献[1]可知, 增加输入信号的有效量化位数, 可提高 AD 转换器的信噪比, 因此为了提高后端数字信号处理质量, 需要在 AD 量化前对信号进行自动增益控制, 将输入信号幅值稳定在某一最佳量化值附近, 确保在接收强信号时 AD 转换器不溢出, 同时在接收弱信号时增加有效量化位数、减小量化噪声, 使输入信号信噪比最大化, 提高后端数据处理质量。

由于传统模拟自动增益控制 (AGC) 抗噪声能力差, 容易

受到温度的影响, 难以实现高精度控制, 且控制稳定性和灵活性较差, 环路时间常数等一旦确定就无法改变。随着微电子技术和软件无线电技术的发展, 使得采用数字化方法实现 AGC 成为可能。数字 AGC 具有调节方便、反馈快捷、精度高等特点, 大大增强了 AGC 的适用性和灵活性。

Khoury<sup>[2]</sup>、张立志等<sup>[3]</sup>对 AGC 系统的稳定时间问题进行了讨论, 指出当以对数表示环路方程时, AGC 环路可等效为一线性系统, 具有固定的稳定时间, 并对稳定时间进行了定性定量分析。Liu 等<sup>[4]</sup>建立了反馈式数字 AGC 环路的数学模型,

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2011-11-21

作者简介: 姜坤, 博士研究生, 研究方向为高速数字信号处理、航天器测量与控制、深空探测, 电子信箱: jiangkunzy@126.com; 王元钦 (通信作者), 教授, 研究方向为微弱信号检测、航天器测量与控制, 电子信箱: wangyuanqin@126.com

对 AGC 系统传递函数和暂态响应进行了分析。李政等<sup>[9]</sup>提出了一种基于绝对值方法或滑窗最大值法的高效数字检波法,但却未对该算法的抗噪声性能进行分析。

本文结合工程实践需求,从 AGC 系统的稳定时间和控制精度两个关键指标入手,针对传统 AGC 系统稳定时间和控制精度正相关的问题,提出了一种稳定时间和控制精度独立可控的 AGC 系统,推导了 AGC 结构的环路方程、控制精度和稳定时间,对几种功率估计方法在低信噪比条件下进行了对比分析,设计了一种满足低信噪比条件下高稳定度、输出精度可控、稳定时间可调的数字 AGC 系统。

### 1 传统反馈式对数 AGC 系统

根据增益控制量的不同,AGC 环路可分为线性 AGC 环路和对数 AGC 环路,由于线性 AGC 环路的时间常数(表征电路瞬态过程中响应变化快慢的常数)随输入信号幅值的变化而变化,为了克服这一问题,通常采用对数 AGC 环路。传统的反馈式对数 AGC 主要由功率估计、阈值比较和增益控制单元组成,其结构框图如图 1 所示。

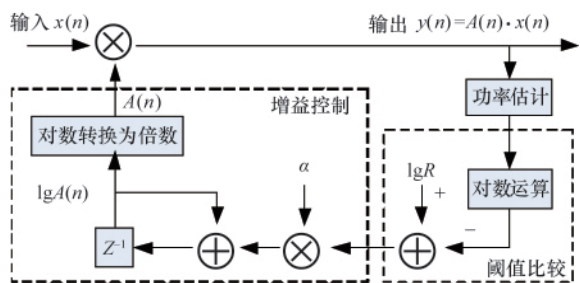


图 1 传统反馈式对数 AGC 结构框图  
Fig. 1 Block diagram of traditional feedback logarithmic AGC

图 1 中,  $x(n)$  表示输入信号,  $A(n)$  表示倍数增益,  $y(n)$  表示进行增益控制后的输出信号,  $lgR$  为参考门限阈值,  $\alpha$  为环路增益因子。该环路首先计算接收信号的平均功率,然后与参考门限  $lgR$  进行比较,产生误差信号,误差信号乘以增益因子  $\alpha$  ( $\alpha \leq 1$ ,  $\alpha$  的大小决定了环路稳态控制精度),通过环路滤波,对增益控制量进行平滑,最后根据得到的增益控制量对输入信号进行增益控制。

评价 AGC 性能的指标主要有稳态响应精度和动态响应时间。假定输入信号  $x(n)$  为幅度为  $c$  的阶跃信号,即  $x(n) = c \cdot u(n)$ , 其中  $u(n)$  为单位阶跃函数,则其增益控制响应可表示为<sup>[6]</sup>:

$$lgA(n) = -lg\{(c/R)[1 - (1 - \alpha)^n]u(n)\} \quad (1)$$

由式(1)可知,增益控制量的稳态值为  $R/c$ ,与期望一致,环路时间常数为  $1/\alpha$ ,环路稳态精度与  $\alpha$  呈正比,即环路时常数和稳态精度均由参数  $\alpha$  决定。因此,  $\alpha$  越小,环路稳态精度越高,但同时环路时间常数越大,响应速度越慢、稳定时间越

长,从而造成了高控制精度和快速响应之间的矛盾。

### 2 传统反馈式对数 AGC 系统改进

为了解决传统反馈式对数 AGC 结构存在的高控制精度与快速响应之间的矛盾,借鉴文献[7]中  $\alpha$ - $\beta$  滤波思想,提出了一种控制精度和稳定时间独立可调的反馈式对数 AGC 系统,其系统框图如图 2 所示。

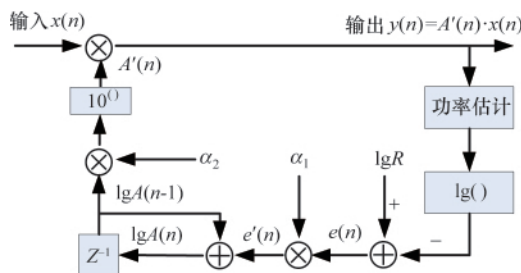


图 2 稳定时间、控制精度独立可调 AGC 系统框图  
Fig. 2 Block diagram of AGC system with independent adjustable settling time and control accuracy

图 2 中,  $A'(n)$  表示倍数增益,  $e(n)$  为输入信号功率与参考门限的差值,  $e'(n)$  为经过环路增益因子  $\alpha_1$  处理后的差值,  $\alpha_1$  为控制稳态精度的环路增益因子,  $\alpha_2$  为控制稳态时间的环路增益因子,其中  $\alpha_1, \alpha_2 \leq 1$ ,由图 2 可得环路的传递关系为

$$\begin{cases} y(n) = A'(n) \cdot x(n) \\ A'(n) = 10^{\alpha_2 lgA(n-1)} \\ lgA(n) = \alpha_1 \sum_{i=0}^n [lgR - lgy(i)] \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得

$$lgA'(n) = \alpha_1 \alpha_2 \sum_{i=0}^{n-1} \{lgR - lg[A'(n)x(n)]\} \quad (3)$$

对式(3)进行差分运算,可得

$$\Delta lgA'(n) = -\alpha_1 \alpha_2 [lgA'(n-1) + lg|x(n-1)|] + \alpha_1 \alpha_2 lgR \quad (4)$$

其中,  $\Delta lgA'(n) = lgA'(n) - lgA'(n-1)$ 。由式(4)可知,当用对数表示时,AGC 环路变为一阶线性系统,可得其时间常数  $\tau = \alpha_1 \alpha_2$ ,为固定值,与输入信号大小无关。在系统设计中,为了便于数字化处理,将  $\alpha_1, \alpha_2$  分别设为  $2^{-N}, 2^{-M}$ ,则  $\tau = 2^{-(M+N)}$ ,从而在进行乘法运算时只需进行移位,大大减小了计算量。

设 AD 量化位数与误差  $e(n)$  量化位数均为  $L$ ,则  $e'(n)$  相当于取  $e(n)$  的前  $(L-N)$  位进行误差控制,其误差被积累的充要条件为

$$e(n) \cdot 2^{-N} \geq 1 \quad (5)$$

即当环路达到稳态时,其输出稳态值与参考值之差小于等于  $10 \cdot 2^{N-L}$  dB,系统的  $2^{N-L}$  环路稳定时间为  $lg(2^{-N})/lg[1 - 2^{-(M+N)}]$ 。即在一定的 AD 量化位数下,该 AGC 结构的稳态控制精度仅由常数  $N$  决定,优于  $10 \cdot 2^{N-L}$  dB;时间常数可由  $M$  控制,与  $2^{M+N}$  呈正比,其  $2^{N-L}$  环路稳定时间为  $lg(2^{-N})/lg[1 - 2^{-(M+N)}]$ ,从而实现

了 AGC 系统控制精度和稳定时间两个关键指标的独立可控。

### 3 低信噪比下信号功率估计方法

在 AGC 系统中,为了实现高精度控制,除了要求环路可检测误差精度高外,作为误差判决的基础,功率估计的精度也要高。根据信号形式的不同,常用的功率估计方法可分为两类:对于 I、Q 支路信号而言,可采用  $P+Q^2, |I|+|Q|, \max(|I|, |Q|)+\frac{1}{2} \min(|I|, |Q|)$ ; 对于单通道信号可以采用平方和、滑窗最大值和低通滤波(或均衡网络)的方法求取信号功率。由于本文的应用背景为单通道信号,因此重点对单通道信号功率求取方法进行论述。由文献[5]、[8]可知,低通滤波(或均衡网络)法得到的仅是信号的低频包络,其幅值并不能直接反映信号的功率,需要在求出的包络幅值上增加一个增量,而这个增量对于不同的信号是不相同的,这就限制了该方法的通用性。为了体现一般性,本文重点对平方和法和滑窗最大值法进行研究,分析两种方法在不同信噪比下的估计性能。

测控信号通常为恒包络调相信号,设信号模型为

$$x(n)=A \cos(\omega_0 n+\Psi(n))+w(n) \quad (6)$$

其中,  $A$  为信号包络,  $\omega_0$  为载波角频率,  $\Psi(n)$  为副载波,  $w(n)$  为高斯白噪声。

#### 3.1 平方和功率估计法

平方和功率估计法如图 3 所示。

由式(6)及信号和噪声的互不相关性,可得

$$E\{|x(n)|^2\}=\frac{A^2}{2}+\frac{A^2}{2}E\{\cos(2\omega_0 n+2\Psi(n))\}+E\{w^2(n)\} \quad (7)$$

当  $N \rightarrow \infty$  时

$$\sum_{i=1}^N |x(i)|^2=E\{|x(n)|^2\}= \frac{A^2}{2}+E\{w^2(n)\}=P_x+P_w \quad (8)$$

其中,  $P_x$  为信号功率,  $P_w$  为噪声功率。平方和功率估计法能够直观、准确地反映输入信号总功率的变化,其功率估计精度和估计值更新速度均与累加点数  $N$  有关。平方和功率估计法具有良好的抗干扰能力,在低信噪比条件下,可以通过增加累加点数  $N$  对噪声波动进行平滑,从而得到较为准确的估计结果。

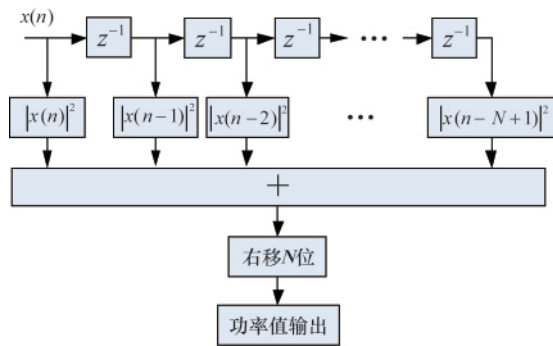


图 3 平方和功率估计法

Fig. 3 Estimation method of the sum of squares power

#### 3.2 滑窗最大值法

滑窗最大值法<sup>[9]</sup>如图 4 所示。该方法通过求取长度为  $N$  的窗函数中的最大值,并以某一步进值进行滑动,求取相应滑动窗内数据的最大值,将所有最大值连起来从而获取输入信号的包络,其中滑窗长度建议选取  $N=\text{ceil}(F/2f_{\min})$ ,其中,  $F_s$  为信号采样频率,  $f_{\min}$  为信号最低频率,  $\text{ceil}$  表示趋向于正无穷的最近整数,其包络值更新速度与滑窗步进值有关。该方法的优点是能够直接获取输入信号的包络,无需乘法运算,实现简单;缺点在于抗干扰能力差,由于是对滑窗内的数据取最大值,因此当信噪比较低时,信号包络会随噪声影响而上下波动,从而造成求出的包络值与实际信号功率产生偏差。

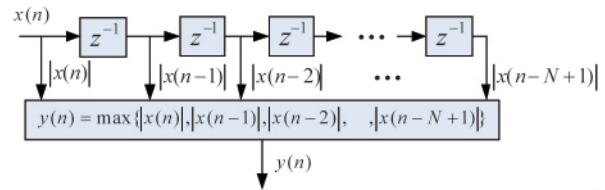
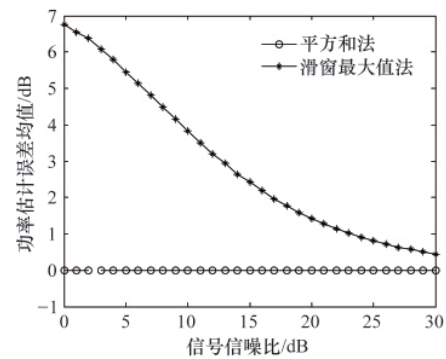


图 4 滑窗最大值法

Fig. 4 Maximal values of slip windows method

为了对比两种功率估计方法的抗噪声性能,分别在不同的信噪比下对平方和法和滑窗最大值法的估计性能进行蒙特卡洛仿真。仿真信号为 BPSK 信号,采样频率为 56MHz,信号载波频率为 70MHz,副载波频率为 1MHz, BPSK 信号码速率为 512KHz,信号信噪比为 0—30dB,步进 1dB。平方和法的累加点数以及滑窗最大值法的滑窗长度和滑窗步进均为 1024 点。在不同的信噪比下,分别进行 100 次蒙特卡洛实验,对实验结果进行统计分析,得到不同信噪比下功率估计误差的均值和标准差如图 5 所示。

由仿真结果可知,在低信噪比条件下,平方和法的估计性能要远远好于滑窗最大值法,与理论分析一致。虽然平方和法的计算量要大于滑窗最大值法,但是在低信噪比条件下,滑窗最大值法的估计性能较差,无法满足实际应用需求,因此建议采用平方和法进行功率估计。



(a) 估计误差均值

(a) Mean of estimation error

图 5 不同信噪比下平方和法与滑窗最大值法性能对比

Fig. 5 Comparison between sum of squares and maximal values of slip windows methods with the different SNR

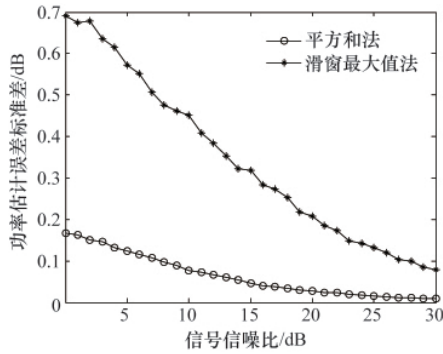


图5 不同信噪比下平方和法与滑窗最大值法性能对比(续)

Fig. 5 Comparison between sum of squares and maximal values of slip windows methods with the different SNR (Continued)

#### 4 系统仿真分析

采用平方和功率估计法对整个 AGC 系统进行仿真,仿真

条件如表 1 所示。

表 1 AGC 系统仿真条件  
Table 1 Simulation conditions of AGC system

参数类型	设置值	参数类型	设置值
采样频率	56MHz	信号形式	BPSK
载波频率	70MHz	副载波频率	1MHz
BPSK 信号码速率	512KHz	信噪比	60dB
输入信号量化位数	14 位	对数误差量化位数	14 位
输入信号幅值	24 和 0.024	期望输出信号幅值	4
估计点数	1024		

为了验证该 AGC 系统具有稳定时间和控制精度独立可控的功能,分别在 2 种环路因子下进行仿真:(1)  $\alpha_1=2^{-2}, \alpha_2=2^{-1}$ ; (2)  $\alpha_1=2^{-2}, \alpha_2=2^1$ , 仿真结果如图 6 所示。

由仿真结果可知,系统对不同幅度的输入信号,环路稳定时间是一致的。通过分别调节环路增益因子  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,可以对环路稳定时间和控制精度进行独立控制,能够在满足一定

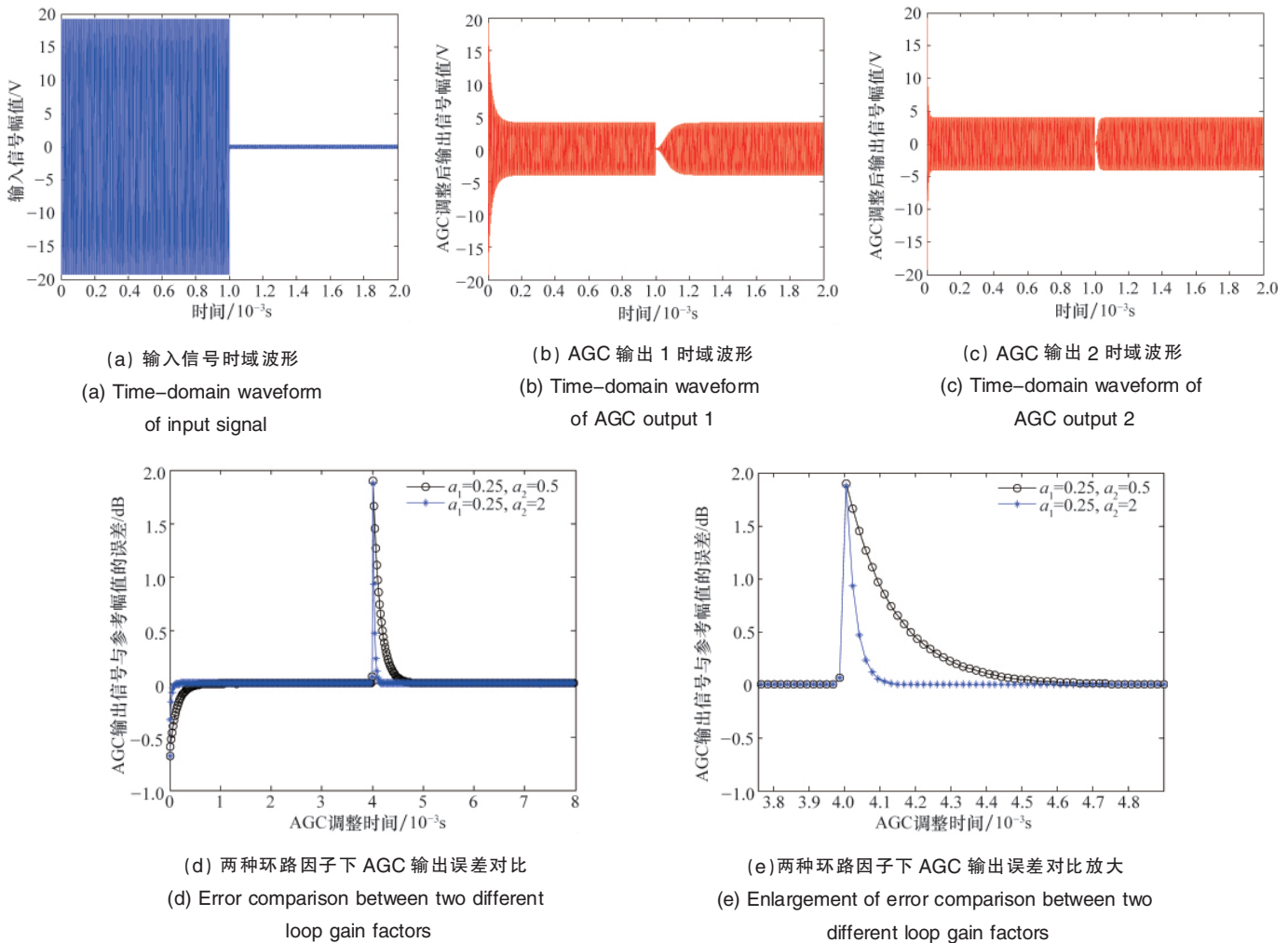


图 6 2 种环路因子下 AGC 系统仿真  
Fig. 6 Simulation of AGC system with two different loop gain factors

控制精度的条件下,通过调整环路增益因子  $\alpha_2$  增大或减小环路稳定时间。

## 5 结论

提出了一种稳定时间和控制精度独立可调的数字 AGC 系统实现方法,推导了环路方程,以及环路稳定时间和控制精度等参数,说明了参数的设置方法和 FPGA 实现技巧。分析对比了低信噪比条件下,平方和功率估计法和滑窗最大值功率估计法的估计性能,建议在低信噪比时采用平方和功率估计法。在不同的环路增益因子下对 AGC 系统进行了仿真分析,结果表明系统在低信噪比下具有优良的性能,环路稳定时间不随输入信号幅度的改变而改变,可根据实际需求,对稳定时间和控制精度进行调节。该系统已实用于某中频接收处理设备中。

### 参考文献 (References)

- [1] 杨小牛,楼才义,徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 103-104.  
 Yang Xiaoniu, Lou Caiyi, Xu Jianliang. Principle of software radio and its application [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2006: 103-104.
- [2] Khoury J M. On the design of constant settling time AGC circuits[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal*

*Processing*, 1998, 45(3): 283-294.

- [3] 张立志, 饶龙记, 邬江兴. 自动增益控制环路方程的一种简化处理方法及环路稳定时间分析[J]. 通信学报, 2005, 26(6): 94-99.  
 Zhang Lizhi, Rao Longji, Wu Jiangxing. *Journal on Communications*, 2005, 26(6): 94-99.
- [4] Liu A D, An J P, Wang A H. Design of a digital automatic gain control with backward difference transformation [C]. 2010 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shenzhen, 23 Sep, 2010.
- [5] 李政, 杨建宇, 郑立岗. 高效数字检波的自动增益控制环路研究[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(3): 316-319.  
 Li Zheng, Yang Jianyu, Zheng Ligang. *Journal of UEST of China*, 2005, 34(3): 316-319.
- [6] 王超, 于宗英. 一种快速数字 AGC 结构的分析与设计 [J]. 计算机与信息技术, 2008(3): 41-43.  
 Wang Chao, Yu Zongying. *Computer and Information Technology*, 2008 (3):41-43.
- [7] 董智红, 崔巍, 吴嗣亮. 全数字式前馈 AGC 设计与 FPGA 实现[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(12): 1093-1095.  
 Dong Zhihong, Cui Wei, Wu Siliang. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(12): 1093-1095.
- [8] 曹鹏, 费元春. 大动态宽带数字中频 AGC 系统的设计 [J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(5): 613-616.  
 Cao Peng, Fei Yuanchun. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, 23(5): 613-616.

(责任编辑 郑伟, 刘志远)

· 学术动态 ·



## “第九届全国表面工程学术会议”征文

由中国机械工程学会主办的“第九届全国表面工程学术会议”拟于 2012 年 10 月 26—28 日在浙江宁波召开。

征文范围: 表面工程基础理论、表界面科学; 物理气相沉积和化学气相沉积薄膜技术; 电 / 化学沉积、阳极 / 微弧氧化等液相表面处理技术; 喷涂及自动化表面工程技术; 化学表面热处理、三束材料表面改性技术; 氮化、渗碳、三束等材料表面改性技术; 功能薄膜(光、电、磁功能薄膜); 有机涂层技术; 分子薄膜、微纳表面工程; 摩擦、磨损与润滑; 腐蚀与防护技术; 生物表面工程; 其他表面工程相关研。

摘要截稿日期: 2011 年 12 月 31 日。

电 话: 027-83641631

电子信箱: zhangfanwh@qq.com