

doi: 10.7690/bgzdh.2018.04.005

## 对数混合的短波信道数字 AGC 算法

宋斌斌<sup>1</sup>, 金慧琴<sup>1</sup>, 田伟<sup>2</sup>, 王正磊<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学电子信息工程系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学训练部, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 为减小短波信道对接收机 AD 后端信号输出功率的影响, 提出一种对数混合的短波信道数字 AGC 算法。分析了数字 AGC 的线性调整算法、对数调整算法、自然对数调整算法, 采用自然对数与对数混合式的调整算法, 实现短波接收机 AD 后端数字信号功率稳定变化。仿真结果表明: 混合式 AGC 算法实现了 AGC 跟踪速率和对噪声的敏感性的折中, 整体性能最优, 且算法的实现复杂度与线性、对数和自然对数 AGC 算法基本相当。

**关键词:** 短波; 自动增益控制; 误码性能

**中图分类号:** TP312 **文献标志码:** A

## Digital AGC Algorithm for Short-wave Channel Based on Logarithmic Mixture

Song Binbin<sup>1</sup>, Jin Huiqin<sup>1</sup>, Tian Wei<sup>2</sup>, Wang Zhenglei<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Information Engineering, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Training, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** For reducing the influence of short-wave channel to signal output power of AD after end in receiver, the paper proposes a digital AGC algorithm for short-wave channel based on logarithmic mixture. It analyzes the linear adjustment algorithm, logarithmic adjustment algorithm, natural logarithmic adjustment algorithm of digital AGC, adopts a mixed adjustment algorithm of natural logarithmic and logarithmic, implements the stability change of digital signal power of AD after end in short-wave receiver. Simulation results show the mixed AGC algorithm achieved the compromise between AGC tracking rate and sensitivity of noise, the overall performance is optimal, and the complexity is basically the same as linear, logarithmic and natural logarithmic algorithm.

**Keywords:** short-wave; automatic gain control; BER performance

### 0 引言

短波通信采用天波传播, 利用电离层反射实现超视距的通信。由于短波通信受时间、地点、季节和气候等因素的影响, 是一类时变色散信道<sup>[1]</sup>, 信号在传输过程中存在自由空间衰减损耗、电离层吸收损耗、多跳模式传播时地面吸收损耗等衰减现象, 使得接收端信号振幅出现衰落现象, 衰落深度可达 60 dB<sup>[2-3]</sup>。为克服衰落对系统的影响, 使信号电平处于接入范围内, 可采用前端模拟信号的自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 方法, 自适应输入信号的变化, 但要实现 AD 后数字信号的正确处理, 就需要后端的数字 AGC, 使信号功率满足处理要求。笔者主要研究后端数字 AGC 处理技术, 分析不同 AGC 算法和不同 AGC 处理速率对短波信道均衡的改善程度, 提出一种自然对数与对数混合式调整算法的调整方式, 实现信号功率变化稳定。

### 1 短波信道 AGC 控制方式

AGC 主要用于射频和下变频电路的增益进行

自适应调整, 经 AGC 电路自动控制后输出信号的范围满足后一级电路的处理要求, 使用 AGC 的目的主要包括: 1) 减小接收信号的动态范围, 克服信号剧烈变化的动态范围对 ADC 电路的影响, 降低精度以及动态范围需求; 2) 补偿信道衰落, 补偿由阴影效应、路径损耗等引起的信号的慢衰落, 跟踪快衰落, 使输入信号保持在恒定范围内, 降低 ADC 的量化噪声<sup>[4]</sup>; 3) 确保电路的正常工作, 抑制大信号和放大小信号, 有效地压缩信号的动态范围, 并使之保持在正常的范围<sup>[5]</sup>。

为实现可靠的数据解调, 接收端将进行 3 次 AGC 控制:

1) 短波电台为可靠输出单音调制的、语音频段范围内的数据信号, 其对接收的射频信号在处理过程中进行自动增益控制;

2) 音频信号输出至数字信号处理电路, 对音频信号进行模拟 AGC 控制, 将音频信号幅度调整到 AD 范围内, 并与短波信道机音频通道实现有效隔离;

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-01-13

作者简介: 宋斌斌(1979—), 男, 江西人, 博士, 讲师, 从事无线通信研究。

3) 采样后的音频信号，首先经过 AGC 算法对信号进行预处理，确保功率变化稳定，然后通过数字信号处理，实现子载波解调、信道均衡和数据译码等<sup>[6]</sup>。

笔者研究的数字 AGC 算法，在短波数字通信自动增益控制的第 3 阶段进行，主要针对采样后的数据信号进行处理。

## 2 短波信道数字 AGC 算法

数字 AGC 通过比较采样信号幅度与参考信号幅度，产生比较误差信号。误差信号经滤波处理后，作为控制信号，以控制输出信号的幅度<sup>[7]</sup>。针对短波信道的慢衰变特性，笔者分析了数字 AGC 的线性调整算法、对数调整算法、自然对数调整算法，提出一种自然对数与对数混合式调整算法的调整方式，以减小短波信道对接收信号输出功率的影响。

### 2.1 线性 AGC 算法

线性 AGC 算法通过误差信号的线性关系，调整 AGC 控制因子。图 1 是线性 AGC 控制的关系。其中： $x(n)$  为输入信号； $y(n)$  为输出信号； $g(k)$  是时刻  $n$  对应的 AGC 第  $k$  次自动控制因子； $R$  为发送信号的参考幅度；幅度估计值  $L$  采用取均方根方式求得。

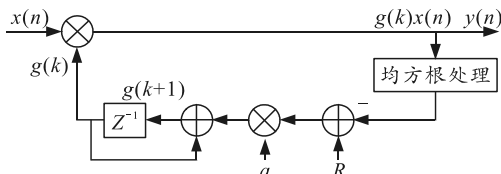


图 1 线性 AGC 控制关系

由图 1 可得如下关系式：

$$y(n) = x(n)g(k) \quad (1)$$

设 AGC 调整速率为  $K$ ，即每  $K$  个采样符号进行一次 AGC 调整，则

$$k = \left\lfloor \frac{n}{K} \right\rfloor \quad (2)$$

$[A]$  表示对  $A$  进行向下取整：

$$L = \sqrt{\left( \sum_{n=1}^K |y(n)|^2 / K \right)} \quad (3)$$

$$g(k+1) = g(k) + a(R - L) \quad (4)$$

$K$  越小，表明计算幅度估计值  $L$  所采用的样本数越少，AGC 调整时间越短，即 AGC 速率越高；反之，AGC 速率越低。为分析其幅度跟踪性能，设输入信号为突变阶跃信号，即  $x(n) = cu(n)$ ，则可得

$$g(k+1) = g(k) + a(R - c) \quad (5)$$

在以上差分方程中， $c$  可视为跳变的信号幅度，在信号幅度值估计时，如果  $c$  大于参考信号  $R$ ，则下一周期的调整因子  $g(k+1)$  相对当前时刻  $g(k)$  调整因子将减小，反之增大，说明该调整算法能跟踪信号幅度的变化，可对信号幅度进行调整；但从该差分方程也可以看出，该差分方程环路延迟常数与  $1/ac$  成正比，说明信号幅度有小幅度突变时，AGC 控制环路具有较大的时间延迟，才能到达稳定状态，不利于快速衰落信道的幅度跟踪。

### 2.2 对数 AGC 算法

对数 AGC 算法中相关符号说明同线性 AGC 算法。对数 AGC 算法将 AGC 增益因子的调整关系由线性形式调整为对数形式，对数 AGC 算法的原理框图如图 2。

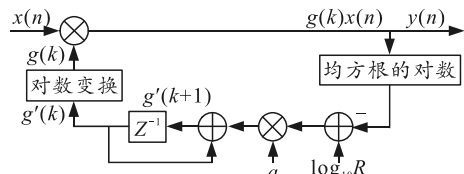


图 2 对数 AGC 算法调整关系

由图 2 可得如下关系式：

$$g(k+1) = g(k) + a(\log_{10} R - \log_{10} L) \quad (6)$$

$$g(k+1) = 10^{g(k)} \quad (7)$$

对数 AGC 算法，当输入跳变信号  $x(n) = cu(n)$  时，其差分方程环路延迟常数将与  $1/[a \log_{10}(c)]$  成正比，说明信号幅度有小幅度突变时，AGC 环的时间延迟将明显快于线性 AGC 算法，AGC 的时间延迟可以通过对数关系得到有效改善，系统达到稳定速度加快；在计算 AGC 调整因子时，通过 10 的幂次方调整，说明 AGC 因子调整深度比较深，可能会导致系统对信号幅度变化非常敏感，对数 AGC 算法易受噪声干扰<sup>[8]</sup>。

### 2.3 自然对数 AGC 算法

指数 AGC 算法原理同对数 AGC 算法，只是在求取 AGC 增益因子和误差时，由对数运算改为指数运算，如图 3 所示。

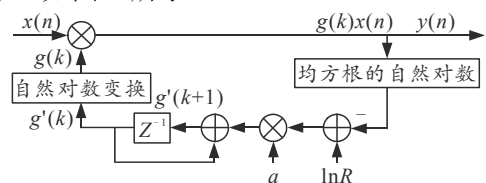


图 3 自然对数 AGC 算法调整关系

对于图 3，同样有如下关系：

$$g(k+1) = g(k) + a[\ln(R) - \ln(L)]; \tag{8}$$

$$g(k+1) = e^{g^{(k+1)}}. \tag{9}$$

其中  $e$  为自然对数。相比对数运算，当输入跳变信号  $x(n) = cu(n)$  时，其差分方程环路延迟常数与  $1/[a \ln(c)]$  成正比；相对对数 AGC 算法，AGC 环的时间延迟将小于对数 AGC 算法，但快于线性 AGC 算法；自然对数 AGC 算法调整因子采用自然对数的幂次方，相对对数 AGC 算法，其调整深度降低，对数 AGC 算法降低了信号幅度的敏感性，但对信道衰落跟踪性能也有所降低<sup>[9]</sup>。为此，笔者提出了混合式数字 AGC 算法，综合考虑跟踪精度与对噪声敏感问题，提高算法的性能。

### 2.4 混合式数字 AGC 算法

混合式数字 AGC 算法在解算误差时采用对数运算，以提高对误差信号的敏感度；在求取 AGC 增益因子时，采用指数运算，减小 AGC 调整因子的调整深度，降低受噪声干扰的影响，从而在 AGC 环达到稳定所需时间和对信号幅度的敏感性之间，采取折中，以求得 AGC 算法的优异性能。

混合式 AGC 算法组成框图如图 4 所示。

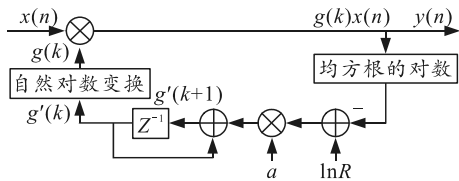


图 4 混合式 AGC 算法调整关系

其 AGC 因子调整关系为：

$$g(k+1) = g(k) + a[\log_{10}(R) - \log_{10}(L)]; \tag{10}$$

$$g(k+1) = e^{g^{(k+1)}}. \tag{11}$$

由此可见：当输入跳变信号  $x(n) = cu(n)$  时，该算法的延迟常数将与对数 AGC 算法一致，其 AGC 调整深度将与自然对数 AGC 调整深度一致。这说明通过采用混合式 AGC 算法，相对线性 AGC、对数 AGC、自然对数 AGC 算法，既保证了算法达到稳定的速度，又降低了 AGC 调整深度因噪声存在而非常敏感的问题，可在算法跟踪速度与信号幅度对噪声敏感度间实现折中。

### 3 短波信道数字 AGC 性能分析

美军标 MIL-STD-188-110B 中窄带短波数据通信的码元速率为 2 400 Baud。当数据率为 4 800

和 2 400 bit/s，帧长度为 48 个码元，前 16 个为训练码元，后 32 个码元为用户数据；当用户数据为 1 200、600、300、150 bit/s 时，帧长度为 40 个码元，前 20 个为训练码元，后 20 个为用户数据<sup>[10]</sup>。数据采样率为 9 600 samples/s，根据用户数据率，短波信道阶数采用 16 阶或 10 阶的经验值<sup>[11]</sup>。

数字 AGC 算法性能衡量，通过将采样信号进行处理后，利用误码率性能衡量。采样信号经过 AGC 处理后，经过下采样、Hilbert 变换，按照其码符号采样率，采样 DDEA 算法进行信道均衡、并估计出用户数据。通过衡量均衡后接收信号的误码率和最小均方误差 (minimum mean square error, MMSE)，比较均衡的效果。通过采用 DDEA 均衡算法，设计最优 AGC 速率和优化 AGC 算法，并综合考虑 AGC 算法复杂度，选取最优均衡算法。

#### 3.1 不同 AGC 算法的误码性能比较

对不同 AGC 算法在相同 AGC 速率下，进行误码性能测试。性能测试仿真条件：数据长度 60 帧 (每帧未知数据和训练序列分别为 32 和 16 个码元，探测序列长度为 48)，过采样因子为 4，每 32 个采样符号进行一次数字 AGC 控制；采用 CCIR 推荐的中纬度中度短波信道，即多径延迟 1 ms，多普勒扩展 0.5 Hz；信噪比为 -5~13 dB、间隔 2 dB 取值；在同样的 DDEA 信道均衡算法下进行 100 次蒙特卡罗仿真，衡量未编码系统误码率性能。其中，数字 AGC 调整因子、接收信号及其各种调整算法调整后的幅值，是信噪比为 13 dB 时的一次实现，未对其进行统计平均。混合、线性、自然对数、对数 AGC 算法下的调整因子仿真如图 5 所示，不同 AGC 算法下的误码率仿真如图 6 所示。

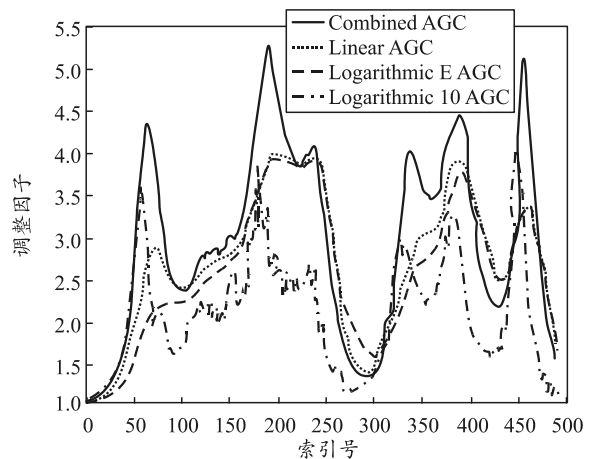


图 5 不同 AGC 算法下的 AGC 调整因子

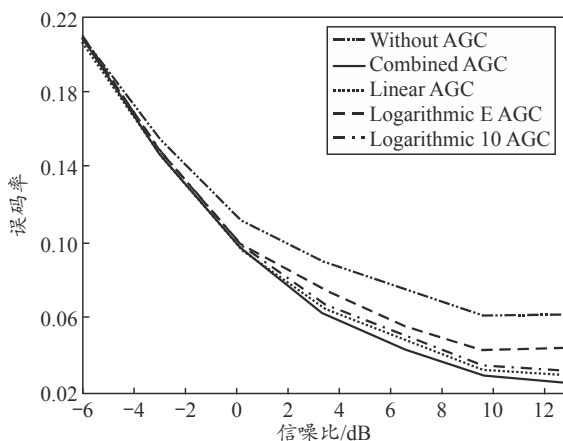


图 6 不同 AGC 算法下的误码性能

由仿真图 5 可以看出：AGC 算法对接收信号都能进行幅度调整；在信号变化快时，采用 AGC 调整因子大，反之较小。由图 6 可以看出：信号经过信道均衡后，采用 AGC 算法后的误码性能明显优于不采用 AGC 调整效果；在线性 AGC 算法、对数 AGC 算法、指数 AGC 算法和混合 AGC 算法中，综合考虑整体性能可看出，混合 AGC 算法性能最优。下面对混合式 AGC 算法在不同 AGC 速率下进行误码性能分析。

### 3.2 混合 AGC 算法不同速率的性能比较

在混合 AGC 算法中，AGC 处理速率影响到对信号衰落的抑制。AGC 处理速率过快，对信号衰落的调整速度加快；反之，AGC 处理速率过慢，对信号衰落的调整速度放缓，AGC 调整作用有限；因此，笔者研究在混合 AGC 算法下、不同 AGC 速率的误码性能。

仿真条件同 3.1 节，采用混合 AGC 算法，但将 AGC 速率分别调整到 16、32、48 个采样符号进行一次 AGC 处理，然后进行调整因子和误码率性能对比，图 7、图 8 分别为不同速率下的调整因子和误码率仿真。

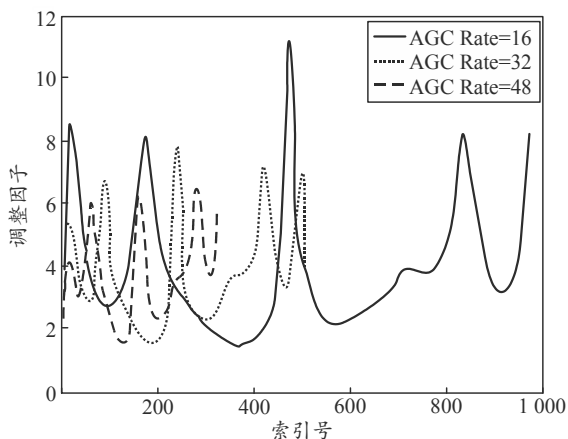


图 7 不同 AGC 速率下的 AGC 调整因子

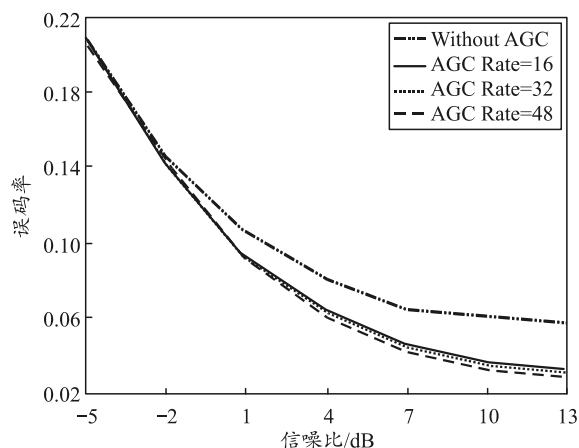


图 8 不同 AGC 速率下的误码性能

由图 7 可以看出：AGC 处理速率过慢，对信号的 AGC 调整作用有限。由图 8 可以看出：在混合式 AGC 算法、不同的 AGC 速率下，误码率性能略有差别。48 点 AGC 速率性能略劣于 32 点 AGC 速率、32 点 AGC 速率略劣于 16 点 AGC 速率，说明 AGC 调整频率越高，对其功率控制效果越好，信道均衡后误码率性能越优。但 3 种 AGC 速率整体均优于不采用 AGC 控制。AGC 调整频率越高，运算复杂度越高。下面对以上几种不同算法复杂度进行对比分析。

### 3.3 算法复杂度分析

AGC 算法一般以信号采样速率进行，由于经过了上采样，信号采样速率显著高于码符号采样速率；因此，位于信号处理前端的 AGC 算法，在算法复杂度上应能满足信号采样速率要求，能对信号进行快速处理。笔者将从以下 2 个方面分析数字 AGC 算法复杂度：

1) 同一 AGC 调整速率、不同 AGC 算法下的算法复杂度分析。

由各数字 AGC 算法组成框图可以看出：它们在计算输出信号、信号功率时，所用到的计算方式完全一致；对数 AGC、自然对数 AGC 和混合式 AGC 算法，在解算 AGC 调整因子时复杂度一致；相对线性 AGC 算法，每解算一次 AGC 调整因子，将增加 3 次指数运算。这说明各类算法在算法复杂度上性能相差不大。

2) 混合式 AGC 算法、不同 AGC 速率下的  $x$  算法复杂度分析。

记需要调整的采样数据长度为  $L$ ，AGC 调整速率为  $K$ ，则对  $L$  个采样数据进行 AGC 调整，其所需要的加法次数和乘法次数分别为：

加法次数： $L+2L/K$ ；

乘法次数： $3L+4L/K$ 。

由此可见：算法复杂度受 AGC 速率影响与 AGC 调整速率  $K$  呈反比，AGC 调整速率对算法复杂度影响不大。以窄带短波数据单音串行通信环境下的参数设置仿真说明，信道码符号速率为 2 400 Baud，过采样因子为 4，AGC 调整速率分别为 16、32、48 个采样符号进行一次数字 AGC 调整，采样数据长度为 1s，其所需加法和乘法次数分别如表 1 所示。

表 1 不同 AGC 速率下的算法对比

运算次数	AGC 调整速率		
	每 16 符号	每 32 符号	每 48 符号
加法运算次数	10 800	10 200	10 000
乘法运算次数	31 200	30 000	29 600

由此可以看出：尽管调整速率对 AGC 算法复杂度有一定影响，但影响效果并不明显。

通过以上算法复杂度分析，说明：

1) 混合式 AGC 算法实现复杂度相对线性、对数和自然对数 AGC 算法，在同一 AGC 速率下，算法复杂度基本相当；

2) 混合式 AGC 算法的 AGC 调整因子对算法复杂度影响小。

综上所述：不同 AGC 算法在实现复杂度上对系统性能影响不大，在设计 AGC 算法时，可重点考虑其对误码性能的影响。

#### 4 结束语

通过对几种 AGC 算法的分析和仿真，验证了混合式 AGC 算法在 AGC 跟踪速率和算法对噪声的

敏感性上折中，AGC 调整性能最优能，可以减小短波信道对接收信号输出功率的影响。在采用混合式 AGC 算法时，AGC 调整速率越高，系统性能越好，算法复杂度越高；反之，性能与算法复杂度均略有降低，但这种变化程度并不明显。

#### 参考文献：

- [1] SHARMA V, RAJ N. Convergence and Performance Analysis of Godard Family and Multi-modulus Algorithms for Blind Equalization[J]. IEEE Transaction on Signal Processing, 2005, 53(4): 1520-1533.
- [2] 徐妍. 短波天波信道特性研究与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [3] 孟庆萍, 周新力, 田伟, 等. 一种改进的短波信道数据引导均衡算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(8): 117-120.
- [4] 谭艳秋. 扩频接收机中数字 AGC 及 DMF 技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [5] 崔家墅. WiMAX 接收机中 AGC 的算法研究和 FPGA 实现[D]. 北京: 北京工业大学, 2008.
- [6] 王文政. Ka 波段临近空间飞行器的信道误码特性[J]. 兵器装备工程学报, 2016(7): 113-117.
- [7] 刘建新. 恒包络信号数字接收机的关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [8] 庞亮, 陈亮, 张翼鹏, 等. 改进的低时延语音增强算法[J]. 通信技术, 2014, 47(11): 1276-1280.
- [9] 张建康, 穆晓敏, 陈恩庆, 等. OFDM 系统中有效信道长度跟踪方案[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2211-2213.
- [10] MIL-STD-188-100B. Interoperability and Performance Standard for Data Modem[J]. US Dept of Defence, 2000(5): 81-156
- [11] 田伟, 周新力, 孟庆萍, 等. 一种信噪比指导信道均衡方式切换的算法[J]. 无线电工程, 2012, 42(4): 12-14.