

## OFDM 系统中基于信号分布函数的 AGC 算法

张小欣<sup>①</sup> 邹黎<sup>②</sup> 赵玉萍<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

<sup>②</sup>(汤姆逊宽带研发(北京)有限公司 北京 100085)

**摘要:** 在正交频分复用系统中, 传统自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)估计接收功率的误差很大。该文提出 OFDM 系统中基于信号分布函数的 AGC 算法, 该算法通过统计模数变换器(Analog to Digital Converter, ADC)输出信号的分布函数来估计接收功率, 克服了 ADC 截断效应的影响。仿真结果表明, 在 OFDM 系统中, 该文给出的 AGC 算法在一次估计后, 估计误差小于 0.23dB, 而传统 AGC 算法的估计误差小于 9dB。因此该文的 AGC 算法能更精确地估计接收功率, 并能大幅度提高系统性能。

**关键词:** 正交频分复用; 自动增益控制; 分布函数

**中图分类号:** TN914.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)10-2415-04

## A Distribution-Function-Based AGC Method in OFDM Systems

Zhang Xiao-xin<sup>①</sup> Zou Li<sup>②</sup> Zhao Yu-ping<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

<sup>②</sup>(Thomson Broadband R & D (Beijing) Co. Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** In Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) systems, there are large estimate errors of the received power in a traditional Automatic Gain Control (AGC). This paper proposes a distribution-function-based AGC method. This method estimates the received power by using the distribution function of the output signal from the Analog to Digital Converter (ADC), and overcomes the clipping effect introduced by the ADC. Simulation results demonstrate that, in OFDM systems, only after one time estimate, the proposed AGC method achieves less than 0.23dB estimate error, whereas the traditional AGC method provides less than 9dB estimate error. Therefore, the proposed AGC method estimates the received power more accurately, and increases greatly the system performance.

**Key words:** OFDM; AGC; Distribution function

### 1 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术目前被广泛应用于数字广播电视(Digital Video Broadcasting, DVB), IEEE 802.11a 和 HIPERLAN/2 无线局域网(Wireless Local Area Network, WLAN)等宽带无线通信系统中<sup>[1-3]</sup>。然而 OFDM 系统性能却很容易受到接收功率的影响。这是由于 OFDM 时域信号呈高斯分布, 信号峰均比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)较高<sup>[4]</sup>, 因此当接收功率较大时, OFDM 信号的分布范围将超出模数变换器(Analog to Digital Converter, ADC)的量化范围而引起截断效应, 降低 OFDM 系统性能。

现有 OFDM 系统均采用自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)来克服以上问题。传统 AGC 通过计算 ADC 输出信号的平均功率来调整接收机前端可变增益放大器(Variable Gain Amplifier, VGA)的增益, 从而使 OFDM 接收机的性能最优<sup>[5, 6]</sup>。然而当接收功率较大时, ADC 的截断

效应会改变其输出信号的平均功率, 增大传统 AGC 的估计误差。

针对以上问题, 本文提出了 OFDM 系统中基于信号分布函数的 AGC 算法。该算法利用 OFDM 信号呈高斯分布的特点, 通过统计 ADC 输出信号的分布函数来估计接收功率, 不受 ADC 截断效应的影响。理论分析和仿真结果均表明, 相对于传统 AGC 算法, 本文给出的 AGC 算法能更精确地估计接收功率, 并能大幅度提高系统性能。

### 2 传统 AGC 算法误差分析

图 1 给出了 OFDM 接收机中的 AGC 环路结构框图。OFDM 接收信号经 VGA 放大后得到模拟信号  $r(t)$ , 再经 ADC 转换为数字信号  $x(n)$ 。AGC 利用  $x(n)$  来计算 VGA 的增益需要调整的大小, 即增益比  $\eta$ , 并将其反馈给 VGA 以控制其调整增益。

传统 AGC 算法通过计算  $x(n)$  的  $N$  个采样点的平均功率  $P_x$  来估计增益比  $\eta$ , 其  $P_x$  的计算公式为

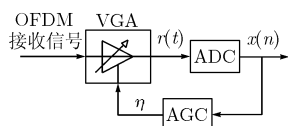
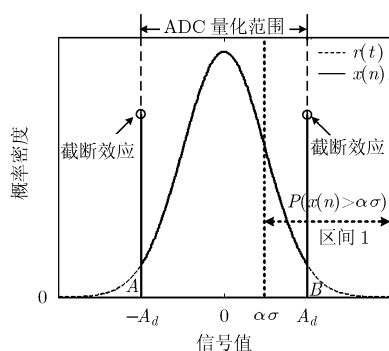


图1 OFDM接收机中的AGC环路结构框图

$$P_x = \left[ \sum_{n=1}^N x^2(n) \right] / N \quad (1)$$

传统AGC算法所估计的平均功率 $P_x$ 是存在误差的，误差的产生原因是ADC的截断效应。设ADC的量化范围为 $[-A_d, A_d]$ ，图2给出了信号 $r(t)$ 和 $x(n)$ 在增益比 $\eta > 0\text{dB}$ 时的概率密度曲线。如图2所示，由于OFDM信号呈高斯分布，所以当接收功率较大时，OFDM信号的分布范围将超出ADC的量化范围而引起截断效应，其中 $r(t) < -A_d$ 的信号(区间A)经ADC后将被截断至 $-A_d$ ， $r(t) > A_d$ 的信号(区间B)经ADC后将被截断至 $A_d$ 。截断效应改变了接收信号的平均功率，增大了传统AGC算法的估计误差。

图2 ADC的输入信号 $r(t)$ 和输出信号 $x(n)$ 在 $\eta > 0\text{dB}$ 时的概率密度曲线

### 3 基于信号分布函数的AGC算法分析

本文提出了基于信号分布函数的AGC算法(以下简称为信号分布法)，该算法也采用如图1所示的环路结构框图。信号分布法的核心思想是利用接收信号的分布函数来实现AGC。虽然当接收功率较大时，ADC的截断效应会影响其输出信号 $x(n)$ 的平均功率，但截断效应并不改变 $x(n)$ 在某些区间内的分布概率。仍以图2为例，定义区间1为 $[\alpha\sigma, \infty]$ 。如图2所示，虽然此时接收功率过大使ADC引入了截断效应，改变了ADC输出信号 $x(n)$ 的平均功率，但对于区间1来说，截断的信号仍然落在该区间内，即分布概率 $P(x(n) > \alpha\sigma)$ 是不变的。信号分布法通过计算分布概率 $P(x(n) > \alpha\sigma)$ 即可求解增益比 $\eta$ 。

由于OFDM时域信号呈高斯分布<sup>[4]</sup>，所以可以近似地认为采样前的信号 $r(t)$ 服从均值为0，方差为 $\sigma_r^2$ 的高斯分布，则其概率密度函数 $f(r(t))$ 可以表示为

$$f(r(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left[-\frac{r^2(t)}{2\sigma_r^2}\right], \quad -\infty < r(t) < +\infty \quad (2)$$

OFDM接收机存在固定的最佳接收方差 $\sigma^2$ ，即当接收信号的均值为0，方差为 $\sigma^2$ 时，OFDM接收机的性能最优。由于实际接收方差 $\sigma_r^2$ 和最佳接收方差 $\sigma^2$ 之间存在差别，因此需要AGC估计此差别并调整VGA去除。增益比 $\eta$ 可以反映此差别，它是VGA的当前增益与最佳增益的比值，在数值上它等于 $r(t)$ 的实际接收方差 $\sigma_r^2$ 和最佳接收方差 $\sigma^2$ 的比值开方

$$\eta = G_p / G = \sigma_r / \sigma \quad (3)$$

式(3)中， $G_p$ 表示VGA的当前增益， $G$ 表示VGA需要调整到的增益，称其为最佳增益，即当VGA工作在该增益时，OFDM接收机的性能最优。

由式(2)和式(3)可求得分布概率 $P(x(n) > \alpha\sigma)$ 为

$$P(x(n) > \alpha\sigma) = \int_{\alpha\sigma}^{\infty} f(r(t)) dr(t) = Q(\alpha/\eta) \quad (4)$$

其中 $Q(\cdot)$ 函数的定义为

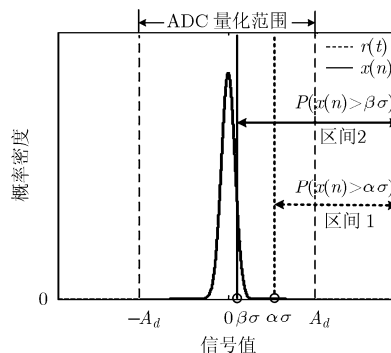
$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{+\infty} \exp(-y^2/2) dy \quad (5)$$

式(4)说明， $x(n)$ 在区间1中的分布概率是和增益比 $\eta$ 呈一一对应关系的，只要估计出 $P(x(n) > \alpha\sigma)$ 的值，就可以将其对应为 $Q(\cdot)$ 函数值，从而精确求解增益比 $\eta$ 。以上就是信号分布法的工作原理。

在 $\eta \ll 0\text{dB}$ 的特殊情况下，如图3所示，由于接收信号的功率过小， $x(n)$ 在区间1中的分布概率 $P(x(n) > \alpha\sigma)$ 几乎为0，这将降低分布概率的计算可信度。为克服这一问题，当增益比 $\eta \ll 0\text{dB}$ 时，可定义区间2为 $[\beta\sigma, \infty]$ ， $\beta < \alpha$ ，此时可通过计算分布概率 $P(x(n) > \beta\sigma)$ 来求解增益比 $\eta$ ，采用的公式为

$$P(x(n) > \beta\sigma) = \int_{\beta\sigma}^{\infty} f(r(t)) dr(t) = Q(\beta/\eta) \quad (6)$$

图4给出了信号分布法在实际应用中的工作流程图。信号分布法每次利用接收信号的 $N$ 个采样点来估计增益比，其估计过程可以划分为如下步骤：(1)选取 $\alpha$ ， $\beta$ 值以确定区间1和区间2的范围；(2)统计 $N$ 个采样点出现在这两个区间的个数，从而计算分布概率；(3)从两个分布概率中选择可信度较高的一个(最接近0.25的一个)；(4)将 $Q(\cdot)$ 函数的取值

图3 ADC的输入信号 $r(t)$ 和输出信号 $x(n)$ 在增益比 $\eta \ll 0\text{dB}$ 时的概率密度曲线

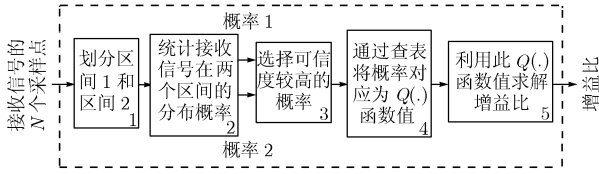


图 4 基于信号分布函数的 AGC 算法的工作流程图

事先存成表, 并通过查表将此分布概率对应为  $Q(\cdot)$  函数值;  
(5) 利用式(4)或式(6)求解增益比。

### 4 仿真结果

本节将给出传统 AGC 算法(以下简称为平均功率法)和本文提出的信号分布法 AGC 在计算机仿真中的性能比较。仿真是在 DVB 系统中进行的<sup>[1]</sup>, 参数设置均依照文献[1]中的定义。系统工作在 2k 模式, 即 FFT 点数为 2048, 采用 3/4 码率的卷积编码和 1/4 长的时域循环前缀。ADC 采用 10 bit 量化, 量化范围为  $[-1, 1]$ , 即  $A_d = 1$ , 此时信号的最佳接收功率为  $\sigma^2 = 0.0618$ 。仿真中, 信号分布法采用的区间 1 为  $[\sigma, \alpha]$ , 即  $\alpha = 1$ , 区间 2 为  $[0.1\sigma, \alpha]$ , 即  $\beta = 0.1$ 。仿真中两种算法都只利用 2048 个  $x(n)$  的采样点来进行 AGC。

图 5 给出了在不同调制方式, 不同信道, 不同信噪比下, DVB 系统中两种 AGC 算法的增益比估计误差比较。其中图 5(a)的调制方式为 64QAM, 信道为文献[1]中定义的静态瑞利信道  $P_1$ , 信噪比为 21.7dB<sup>[1]</sup>, 图 5(b)的调制方式为 QPSK, 信道为多普勒频移为 200Hz 的快衰落瑞利信道  $P_1$ , 信噪比为 10.7dB<sup>[1]</sup>。图 5 是对 100 次独立仿真结果平均得到的, 其横坐标表示实际增益比  $\eta$  (dB), 纵坐标表示增益比的估计误差(dB)。图中, 增益比  $\eta$  的变化范围为  $-15\text{dB} < \eta < 15\text{dB}$ , 即 AGC 的功率调整范围为 60dB, 这符合目前商用 AGC 的功率调整范围。图5说明, 平均功率法在  $-15\text{dB} < \eta < 0\text{dB}$  时可以准确估计出  $\eta$ , 但当  $\eta > 0\text{dB}$  时, 平均功率法的估计误差随  $\eta$  的增加而增大, 当  $\eta = 15\text{dB}$  时, 该估计误差的绝对值已超过 9dB; 而信号分布法在  $-15\text{dB} < \eta < 15\text{dB}$  的范围内均能准确估计出  $\eta$ , 且估计误差的绝对值均小于 0.23dB, 其精度优于目前商用 AGC 所要求的 0.25dB 的精度, 且信号分布法在 64QAM 或 QPSK 下, 在频率选择性静态或快衰落信道下都可以对增益比进行准确估计。

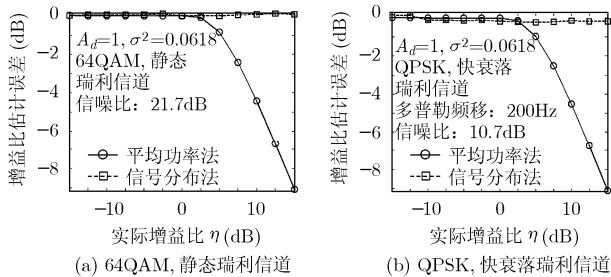


图 5 平均功率法和信号分布法的增益比估计误差比较

图 6 给出了在 64QAM, 静态瑞利信道  $P_1$  下<sup>[1]</sup>, 两种 AGC 算法工作下的 DVB 系统性能比较。图 6 也是对 100 次独立仿真结果平均得到的, 其横坐标表示信噪比(dB), 纵坐标表示误比特率。图中的理想情况表示 AGC 工作理想, 即系统增益比为  $\eta = 0\text{dB}$ , 此时 DVB 系统性能最优。图中的另外 4 条曲线分别表示当系统增益比为  $\eta = 5\text{dB}$  和  $\eta = 10\text{dB}$  时, 采用平均功率法和信号分布法 AGC 的 DVB 系统性能。图 6 说明, 当只采用 2048 个采样点来进行 AGC 时, 随着增益比的增加, 采用平均功率法的 DVB 系统性能下降迅速, 而采用信号分布法的系统性能基本保持不变。

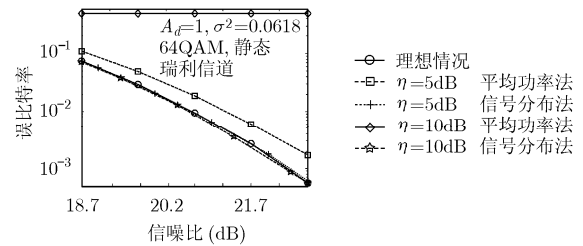


图 6 平均功率法和信号分布法工作下的 DVB 系统性能比较

整个仿真中平均功率法共做了约 2048 次加法和 1 次除法, 信号分布法共做了约 4096 次加法, 1 次查表和 1 次除法, 由于加法运算的复杂度很低, 所以信号分布法的运算复杂度略高于平均功率法。

以上仿真中, 两种算法都只利用了 2048 个  $x(n)$  的采样点来进行 AGC。若改变仿真中两种算法所采用的采样点数, 则当采样点数增加时, 两种算法的估计误差都会减小, 当采样点数减小时, 两种算法的估计误差都会增加。当采用相同的采样点数来进行 AGC 时, 信号分布法的估计误差均小于平均功率法。

因此, 本文提出的基于信号分布函数的 AGC 算法相对于传统的平均功率法能够更准确地估计增益比, 并能提高系统性能, 而该算法的运算复杂度仅略高于平均功率法。

### 5 结束语

传统 AGC 算法通过计算接收信号的平均功率来调整接收机的增益, 这种算法适用于接收信号变化平缓的系统, 如单载波系统; 而对于 OFDM 系统而言, 由于其接收信号变化剧烈且具有高峰均比问题, 所以在 OFDM 系统中, 传统 AGC 算法会受到 ADC 截断效应的影响而降低系统性能。本文提出了一种全新的在 OFDM 系统中实现 AGC 的算法——基于信号分布函数的 AGC 算法, 该算法利用了 OFDM 信号峰均比较高的特性, 通过计算接收信号的分布概率来调整接收机的增益, 完全不同于传统的平均功率法 AGC。本文通过理论分析证明, 新算法完全克服了 ADC 截断效应的影响。通过仿真结果证明, 在一次估计后, 本文给出的 AGC 算法的估计误差小于 0.23dB, 而传统 AGC 算法的估计误差小于

9dB。因此本文给出的算法能在增益比较大时更准确地估计增益比,达到提高系统性能的目的。

### 参考文献

- [1] ETSI. EN 300 744-2004. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television[S]. France, ETSI, 2004.
  - [2] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 802.11a-1999. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band[S]. USA, IEEE, 1999.
  - [3] ETSI. TR 101 475-2000. Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN type 2; Physical (PHY) layer[S]. France, ETSI, 2000.
  - [4] Wulich D, Dinur N, and Glinowiecki A. Level clipped high-order OFDM[J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2000, 48(6): 928-930.
  - [5] Li Chi-Fang and Cheng R J-H. A two-stage digital AGC scheme with diversity selection for frame-based OFDM systems[C]. 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kos, Greece, May 21-24, 2006: 3530-3533.
  - [6] Lee Il-Gu, Son Jungbo, and Choi Eunyoung, *et al.* Fast automatic gain control employing two compensation loop for high throughput MIMO-OFDM receivers[C]. 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kos, Greece, May 21-24, 2006: 5459-5462.
- 张小欣: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线通信中的数字信号处理.
- 邹黎: 女, 1976年生, 研究员, 主要研究方向为无线通信中的数字信号处理.
- 赵玉萍: 女, 1961年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星与无线通信系统理论与实现、无线资源管理与优化、通信中的数字信号处理.