

面向 OFDM 接收机的一种自适应自动增益控制策略

王晓琴, 黑 勇, 周 璇

(中国科学院微电子研究所专用集成电路与系统研究室, 北京 100029)

摘 要: 针对大动态范围、高峰均比的 OFDM 信号, 提出了一种新的自适应自动增益控制 (AGC) 策略. 本策略采用具有混合增益补偿系数的平均绝对误差自动增益控制结构, 并增加了可编程的绝对能量误差参考门限, 实现了灵活的多步长增益补偿机制. 同时, 考虑到低功耗设计的要求, AGC 电路可以给出增益调整成功标志信号. 此外, 该算法具有良好的可扩展性.

关键词: 自适应自动增益控制; OFDM 接收机; 混合增益补偿系数; 绝对能量误差参考门限

中图分类号: TN913 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 08-1642-04

Adaptive Automatic Gain Control for OFDM Receivers

WANG Xiao qin, HEI Yong, ZHOU Xuan

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Automatic gain control (AGC) is very essential for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) receivers, because the significant features of OFDM signals are large dynamic range and high Peak to Average power Ratio (PAR). An adaptive AGC strategy is proposed to improve the convergence speed and maintain the stability of AGC circuits, in which Mean Absolute Deviation (MAD) architecture with hybrid gain compensation parameters and programmable power deviation reference is employed. At the same time, to reduce the power dissipation of receivers, an adjustment successful signal can be given for following digital processing modules. Besides, it can be employed in multi-antenna OFDM systems.

Key words: adaptive automatic gain control (AGC); orthogonal frequency division multiplexing (OFDM); hybrid gain compensation parameters; absolute power deviation reference

1 引言

正交频分复用 (OFDM) 技术的主要思想是: 将信道划分成若干正交子信道, 将高速数据信号转换成并行的低速子数据流, 调制到每个子信道上进行传输. OFDM 技术利用子载波间的正交性, 有效的提高了频谱利用率, 并通过多个子载波将总带宽分割成多个窄带, 从而具有优良的抗多径衰落性能, 保证了系统在高速通信下的可靠性. 因此, OFDM 技术被广泛的应用到各种无线通信系统中 (如欧洲的地面数字音频广播 DAB 和数字视频广播 DVB-T 等).

OFDM 接收机的设计与其目标通信环境密不可分. 对于无线通信, 传输信道纷繁复杂, 比如中国移动数字多媒体广播 (CMMB: China Mobile Multimedia Broadcasting)^[1] 系统, 其通信信道不仅包括各种各样的地面广播信道, 而且还包括复杂的卫星-地面交互式通信信道. 故 OFDM 接收机的输入信号具有动态范围大、峰均比

(PAR) 高的特点. 那么, 在 OFDM 帧开始数据段对输入信号幅度进行反复调整的自动增益控制 (AGC: Automatic Gain Control) 的性能直接影响了基带数据的信噪比. 因此, 自动增益控制对于 OFDM 接收机设计来说至关重要.

针对 OFDM 接收机, 本文提出一种新的自适应自动增益控制算法, 通过改进传统平均绝对误差 (MAD: mean absolute deviation) 结构, 在保证 AGC 系统的收敛速度和稳定性的同时, 实现了灵活的多步长增益补偿. 此外, 可以输出调整成功信号作为后续数字解调器的启动信号, 达到节省功耗的目的. 该算法具有良好的可扩展性.

2 OFDM 接收机模型

目前, 零中频接收机是无线通信领域的一个研究热点. 图 1 为零中频 OFDM 接收机的结构框图.

图中 AGC 模块利用 AD 采样输出信号, 不仅要完成增益的自动调整和跟踪, 而且还需为后续数字解调器提

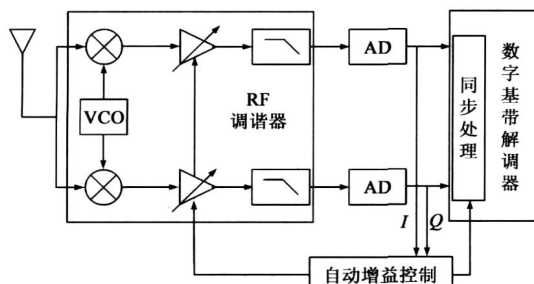


图 1 零中频 OFDM 接收机结构框图

供启动信号——只有当 AGC 调整基本稳定后才给出调整成功信号, 启动基带解调芯片^[2]。在保证数字解调输入的较高质量的同时, 节省整个接收机功耗。

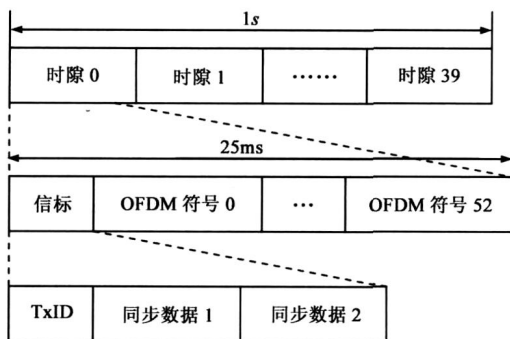


图 2 STMi 协议的帧结构

此外, 采用 OFDM 技术的无线通信系统通常采用规则的帧结构, 协议对 AGC 模块的收敛时间具有严格限制。比如 CMMB 系统采用的 STMi (Satellite-Terrestrial Interactive Multi-service Infrastructure) 协议的帧结构如图 2 所示^[1]。由于数字解调器的输入会随着 AGC 调整过程中出现的增益振荡而忽大忽小, 因此为了保证解调的正确, 要求 AGC 调整过程在信标数据段部分 (约为 4K 采样点) 完成, 当 OFDM 符号进行解调时 AGC 增益已基本稳定。因此, OFDM 接收机中的 AGC 算法必须满足高精度、快速收敛和稳定性好的要求。

3 自适应自动增益控制算法

目前, AGC 的实现方法多种多样。随着数字信号处理技术的不断发展, 全数字 AGC^[3,4]和数模混合设计的 AGC^[5]得到了普遍应用, 并且均采用了数字自动增益控制 (DAGC)。数字自动增益控制器的实现结构主要有: 峰值检测器 (peak detectors)^[6], 平均绝对误差控制器^[7] (MAD: mean absolute deviation) 和平方根控制器^[8] (RMS: root mean square)。各种结构各有优缺点: 使用峰值检测器的 AGC 系统收敛比较快, 且在稳定后信号失真较小, 但是在调整过程中削波现象 (clipping effects) 比较严重; RMS 算法稳定性较好, 但是需要使用复杂的乘法运算; MAD 算法实现结构相对比较简单, 而且可以尽量避免削波现象, 但收敛速度和稳定性是其设计的重点。

3.1 典型的 MAD AGC 结构

图 3 为传统的 MAD 反馈 AGC 电路^[7]。AGC 输出增益可以由如下迭代公式表示:

$$g_{k+1} = g_k + \gamma [P_{ref} - g_k \cdot p(k)] \quad (1)$$

其中, $p(k)$ 是当前输入采样值的估计能量, P_{ref} 是由系统设置的最终期望能量参考值, γ 为增益补偿系数。

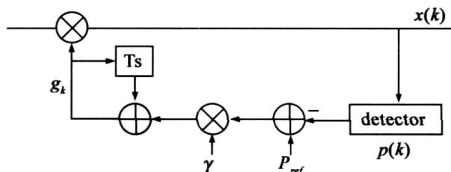


图 3 典型的 MAD 反馈 AGC 系统

增益补偿系数的选择对整个 AGC 系统的收敛速度和稳定性有非常显著的影响。由文献^[9]可知, 较大的增益补偿系数可以使收敛速度加快, 但是增益稳定性较差, 甚至当 γ 足够大时系统不可用; 小的增益补偿系数收敛虽然较慢, 但是其增益调整过程中出现的抖动非常少。因此, 增益补偿系数的选择就是收敛速度和系统稳定性的一个折中。

3.2 改进的 MAD AGC 结构

文献^[9]提出了一种对传统 MAD 结构 AGC 进行改进的采用混合增益补偿系数方案。如图 4 所示, 在增益调整过程中, 设 $\gamma_1 > \gamma_2$, 通过固定门限变换大/小增益补偿系数来达到 AGC 电路的快速调整和稳定跟踪。

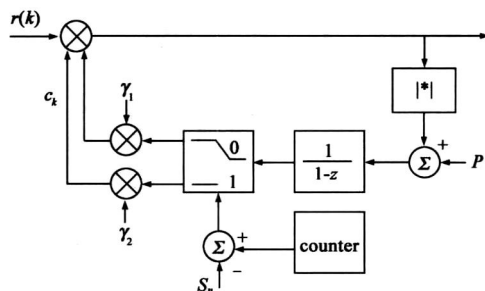


图 4 采用混合增益补偿系数的改进 MAD 结构

但是, 其系数的转换是由一个计数器计数来实现的, 系数转换门限是人为设定的经验采样点数。为了得到合适的门限值, 需要进行大量的实验。这种策略不具有普遍性和灵活性, 而且如果系数转换采样点数门限设置不合适, 还会使得 AGC 系统由于严重的抖动而不能收敛。

3.3 自适应 AGC 算法

为了增加混合系数转换的灵活性和扩展性, 可以作如下改进: 设置可编程寄存器——绝对能量误差参考门限 D_{ref} , 当一段时期内输入估计能量与期望能量参考值之间的误差小于 D_{ref} 时, 系数转换标志自动被置位。在初始调整阶段使用较大的增益补偿系数 γ_1 , 一旦系数转换标志有效就选择小系数 γ_2 , AGC 电路进入细微跟

踪阶段. 因此可以将系数转换标志视为 AGC 调整成功信号.

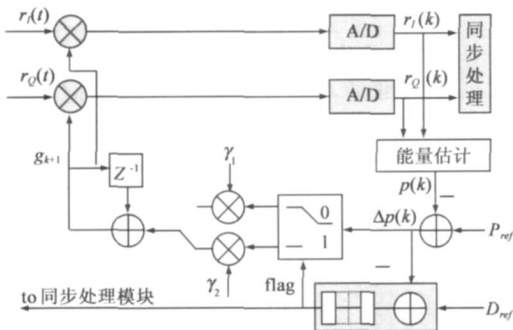


图5 自适应自动增益控制结构

图5为可用于OFDM接收机的自适应AGC系统, 主要由以下几部分组成:

(1) 能量估计模块(PE: power estimation); (2) 绝对能量误差计算模块(APDA: absolute power deviation adder); (3) 系数转换标志生成模块(PCPC: power changing point computer); (4) 增益补偿系数选择器; (5) 可变增益计算模块(VGC: variable gain computer).

工作流程如图6所示:

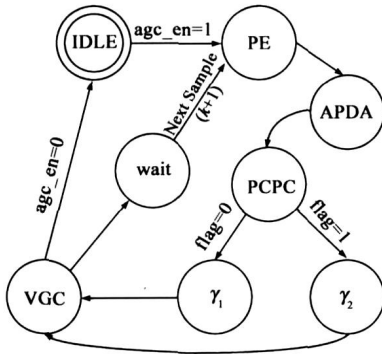


图6 自适应AGC工作状态机

(1) ADC输出的信号经能量估计器后得到当前输入的能量估计值 $p(k)$.

(2) 采样点能量估计值 $p(k)$ 与目标能量参考值 P_{ref} 相减得到绝对能量误差 $\Delta p(k)$.

(3) 混合增益补偿系数转换逻辑由一个加法器和若干个1-bit符号移位寄存器组成。 $\Delta p(k)$ 与绝对能量误差门限 D_{ref} 进行比较, 并将减法结果的符号位存储到移位寄存器中。当所有符号移位寄存器中存储的数据都为‘1’时, 表示这段输入数据的能量与期望值 P_{ref} 的误差均小于系统设定的门限 D_{ref} , 输出系数转换标志, 选择小系数 γ_2 , AGC电路进入细微跟踪阶段, 同时启动后续数字解调器。否则, 继续使用大系数 γ_1 , 对RF端增益进行快速调整。

(4) 可变增益计算模块使用合适的增益补偿系数修改当前输出增益值。

很显然, 改进后的AGC系统还可以根据具体应用环境使用更多个增益补偿系数, 实现更灵活的多步长增益补偿。

4 性能分析

这里, 将前述的改进的自适应AGC策略应用到一个CMMB零中频接收机设计中. 在发射端, 有用数据经过16QAM和IFFT调制后进入信道. 这里信道采用CMMB典型动态多径模型: 具有6条不同路径的Raleigh衰落信道加信噪比为10dB的AWGN信道. 信号经过信道后的动态范围为100dB左右. 接收端, 采用零中频RF调谐器, 在数字基带, 假设 $D_{ref}=3\text{dB}$, $\gamma_1=2^{-6}$, $\gamma_2=2^{-10}$.

4.1 算法性能分析

图7为采用各种不同增益补偿系数方案的AGC系统的性能对比. 由图可知, 增益补偿系数越大AGC收敛速度越快, 但稳定性越差; 系数越小AGC的稳定性越好, 收敛速度越慢. 采用混合系数策略可以达到AGC收敛速度和稳定性的良好折中. 并且采用改进的自适应AGC策略可以在4K采样点之前调整稳定满足STMi协议要求, 实现了自适应系数转换、收敛快、稳定的设计目的。

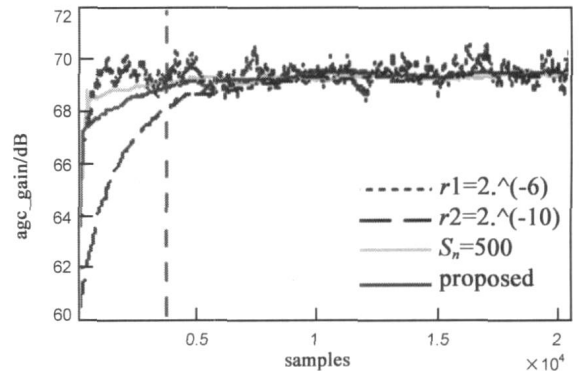


图7 各种增益补偿系数方案的对比

当AGC电路处于稳定跟踪状态, CMMB数字基带解调器对AD采样后信号进行解调, 经过FFT和16QAM解调之后的信号星座图如图8所示. 再经过信道解码之后

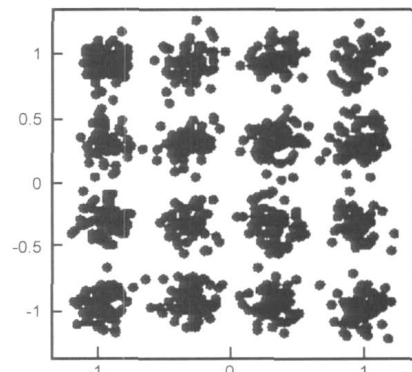


图8 FFT和16QAM解调之后的信号星座图

的系统误符号率(SER)约为 10^{-5} , 满足 CMMB 系统要求。

4.2 ASIC 实现

本算法主要面向大动态范围、实时性要求较高的 OFDM 系统, 因此硬件实现的时候需要注意以下几点:

(1) 混合增益补偿系数的选择, 不仅要保证 $y_1 > y_2$, 而且可以考虑使用移位操作代替乘法操作, 因此 γ 系数的选择可以使用 2 的幂次。

(2) 系数转换标志生成模块中的 1-bit 移位寄存器的数目也会影响 AGC 的收敛速度和稳定性, 可根据具体应用选择。

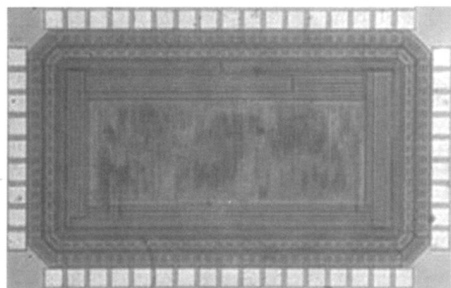


图 9 自适应 AGC 电路版图

图 9 为前述 CMMB 接收机中自适应 AGC 电路使用 HJTC18 工艺流片后的版图, 并经过验证, 其功能和性能符合设计要求。

5 结论

OFDM 技术是无线移动通信的关键技术, 快速、稳定的自动增益控制是 OFDM 接收机中必不可少的部分。本文改进的自适应自动增益控制算法是一种面向 OFDM 接收机的有效策略。通过采用混合增益补偿系数和可编程的绝对能量误差参考门限实现了增益调整的快速和稳定, 保证了 OFDM 接收机基带数字解调器输入的质量。同时, 调整成功标志(也即系数转换标志)的设置符合低功耗设计的要求。

此外, 本算法具有良好的灵活性和可扩展性, 只要将能量估计模块进行稍微改动, 就可以很方便地应用于多天线 OFDM 系统中。

参考文献:

- [1] 移动多媒体广播技术——STMi 介绍[EB/OL]. <http://www.cmm-b.org.cn>, 2006.
- [2] Andrew Fort and Wolfgang Eberle. Synchronization and AGC proposal for IEEE 802.11a burst OFDM systems[A]. GLOBE-COM 2003 Proceedings[C]. San Francisco, USA, 2003: 1335–1338.
- [3] If Gu Lee, Jungbo Son, Eunyong Choi and Sok-Kyu Lee. Fast automatic gain control employing two compensation loop for high throughput MIMO-OFDM Receivers [A]. ISCAS2006 proceeding[C]. The island of Kos, Greece, 2006. 5459–5462.
- [4] Chi-Fang Li, Racy J.-H. Cheng. A two stage digital AGC scheme with diversity selection for frame based OFDM systems [A]. ISCAS2006 Proceedings[C]. The island of Kos, Greece, 2006. 3530–3533.
- [5] Víctor P Gil Jiménez, M Julia Fernández Getino, García, Francisco J González Serrano and Ana García Arnada. Design and implementation of synchronization and AGC for OFDM-based WLAN receivers [J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2004, 50(4): 1016–1025.
- [6] H Shokrollah Timorabadi, E Chen, F P Dawson. A peak detector for multi rate phase locked loop and sequence detector combination for utility AC power Applications[A]. CCECE CCGEI 2006 Proceedings[C]. Ottawa, Canada. 2006. 2199–2202.
- [7] G N Tavares, M S Piedade. High performance algorithms for digital signal processing AGC [J]. IEEE Transactions on Circuit and Systems, 1990, 2: 1529–1532.
- [8] T Kistner, J Bausch, M Babic, K Dostert. Advanced automatic gain control with noise recognition for power line applications [A]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications[C]. 2006, 4: 33–38.
- [9] Cheon in Oh, Seung hyun Choi, Dae ig Jang, Duk kil Oh. Enhanced automatic gain control using the hybrid Gamma parameter in the DVB S2 system[A]. ICAC 2006 Proceedings[C]. Gangwon Do, Korea, 2006. 1167–1171.

作者简介:



王晓琴 女, 1981 年出生于山西省和顺县, 2003 年于北京广播学院(现中国传媒大学)获得工学学士学位, 现为中国科学院微电子研究所硕博连读研究生, 主要研究方向包括: 高速实时信号处理和 MIMO-OFDM 接收机基带关键技术。
E-mail: wangxiaoqin@ime.ac.cn



黑勇 男, 1974 年出生于河北省, 2002 年于中国科学院微电子研究所获得工学博士学位, 现为中国科学院微电子研究所研究员、硕士生导师, 研究兴趣包括高性能可重构数字信号处理器、高性能低功耗无线基带 SOC 设计、超低功耗集成电路设计等。

周璇 男, 1980 年出生于山西省运城市, 2002 年于北京理工大学获得工学硕士学位, 现于中国科学院微电子研究所专用集成电路与系统研究室工作, 主要研究方向: 高速实时信号处理。