

doi: 10.7690/bgzdh.2024.08.004

突发式无线通信的快速 AGC 控制方法研究

陈嘉翔¹, 王轶楷^{1,2}, 孙偲晟¹, 卢飞平¹

(1. 中国兵器装备集团上海电控研究所认知通信研发中心, 上海 200092; 2. 北京理工大学计算机学院, 北京 100081)

摘要: 针对突发式无线通信自动增益控制 (automatic gain control, AGC) 存在的器件非线性、响应时延及调制峰均比问题, 提出一种基于模糊控制和比例微分控制的快速 AGC 控制方法。设计系统结构, 分析 AGC 控制的影响因素, 进行模糊控制粗调和 PD 控制精调, 给出软件流程, 并在常温环境下进行系统实验。实验结果表明: 相比传统 AGC 方案, 该方案可在大动态范围实现快速收敛。

关键词: 突发式无线通信; 快速度 AGC; 非线性; 时延; 模糊控制; PD 控制

中图分类号: TN921 **文献标志码:** A

Research on Fast AGC Control Method for Burst Wireless Communication

Chen Jiexiang¹, Wang Yikai^{1,2}, Sun Caisheng¹, Lu Feiping¹

(1. Cognitive Communication Research and Development Center, Shanghai Electronic Control Research Institute, China South Industries Group Corporation, Shanghai 200092, China;

2. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to solve the problems of device nonlinearity, response delay and PAPR in automatic gain control (AGC) for burst wireless communication, a fast AGC control method based on fuzzy control and proportional derivative control is proposed. The system structure is designed, the influencing factors of AGC control are analyzed, the fuzzy control coarse adjustment and PD control fine adjustment are carried out, the software flow is given, and the system experiment is carried out at room temperature. The experimental results show that compared with the traditional AGC scheme, the proposed scheme can achieve fast convergence in a large dynamic range.

Keywords: burst wireless communication; fast AGC; nonlinear; time delay; fuzzy control; PD control

0 引言

在无线通信中, 由于阴影效应和小尺度快速衰落等影响, 接收机端的输入信号具有很大的动态衰落范围^[1]。这种不确定的接收信号功率波动会严重影响无线通信的通信质量, 工程上常采用自动增益控制 (AGC) 来控制数模转换 (analog-to-digital converter, ADC) 输入信号的动态范围^[2], 使输入信号在 ADC 的线性范围内。相对于常规的通信网络而言, 无线自组网最大的特点就是不需要预先构架网络基础设施来支持, 可以在任何时间、任何地点快速地建立起一个通信网络, 以实现移动节点的信息交互^[3], 每个节点均可与分布在一个较大区域内的其他节点通信。无线自组网按照接入控制方式可分为同步自组网和异步自组网。对于异步自组网而言, 通信过程无需事先协商, 属于突发式通信, 在突发式无线通信中由于通信的时隙并不固定, 接收节点在接收过程时无法预先知道发射节点的发射时间、位置及其发射功率和路损。这就要求突发式无线自组网的接收节点需要接收更大动态范围的信

号, 并更快地调整接收增益将信号幅度收敛到 ADC 的理想区间内, 以满足远场和近场突发信号的接收。这对突发式无线自组网节点的射频接收前端和 AGC 收敛速度提出更高的要求。

突发式无线通信为了实现快速 AGC, 在物理层帧结构中设计有 AGC 帧头, AGC 控制需在 AGC 帧头的时间内通过闭环控制完成增益调整, 否则会影响后续的基带同步和解调处理。通过计算模拟中频 ADC 采样后的信号功率, 将其与功率阈值进行比较, 计算出理想的信号增益, 继而根据信号增益调节射频电路的增益, 使空口波动的射频信号功率在 ADC 采样前能调整到一个较为理想的区间内, 为后续的基带信号处理提供满足要求的数字信号。为了提高通信效率, 需尽量压缩 AGC 帧头长度, 即提高 AGC 收敛速度, 然而接收设备前端模拟器件、射频芯片的非线性, 模拟器件和数字处理的响应时延, 大的调制信号功率峰均比, 均会影响 AGC 收敛速度和稳定性。

针对无线通信系统的 AGC 控制问题, 近年来已有较多研究。文献[4]针对传统自动增益控制系统

收稿日期: 2024-04-25; 修回日期: 2024-05-27

第一作者: 陈嘉翔(1992—), 男, 上海人。

的动态范围较小及收敛速度较慢的问题，提出了一种基于射频峰值检测以及大信号指示的大动态范围数字 AGC 快速控制算法，但并未涉及器件的非线性及响应时延问题。文献[5]针对恒包络调制突发通信信号，为在具有响应时延的情况下快速建立 AGC 稳态响应，提出了一种基于趋势预测的数字 AGC 方案，但不适用于峰均比高的正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)调制信号。笔者围绕器件的非线性、响应时延及峰均比问题，研究突发式无线通信的快速 AGC 控制方法。

1 系统结构

1.1 硬件结构

接收端接收链路硬件结构如图 1 所示，由天线、

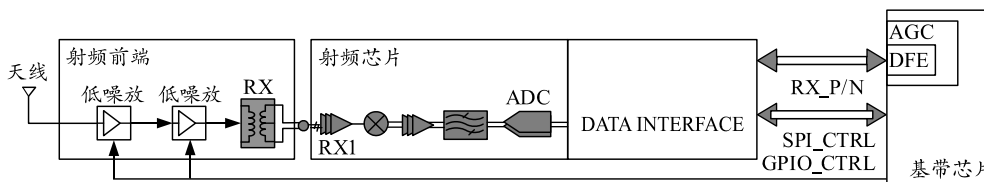


图 1 硬件结构

1.2 AGC 控制结构

突发式无线通信 AGC 控制结构如图 2 所示。射频信号经过射频前端放大后进入射频芯片，在射频芯片内放大、变频、滤波及 ADC 后输出数字中频信号进入基带芯片数字前端(digital front end, DFE)模块。DFE 模块为所选用的基带芯片自带的硬件加速器，该模块可以快速计算出给定长度数字信号的平均功率，并产生中断。基带芯片在中断程序中根据当前信号功率值和理想值，经 AGC 控制算法计算获得增益调整值，通过 SPI 和 GPIO 口控制射频前端的低噪声放和射频芯片完成增益控制。

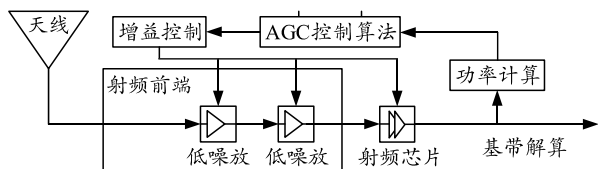


图 2 控制结构

2 AGC 控制算法

2.1 AGC 控制影响因素分析

为了提高通信效率，突发式无线通信需尽量压缩 AGC 帧头长度。为此用于 AGC 调整的 AGC 符号长度都很短，这对 AGC 控制算法收敛速度和稳定性提出了更高要求。

射频前端、射频芯片和基带芯片等组成，其中射频前端包括低噪放、巴伦等。信号从天线口进入第一级低噪放，第一级低噪放将信号放大后进入第二级低噪放再次放大，再经巴伦变换成差分信号进入射频芯片。射频芯片经放大、变频、滤波及数字采样后，得到基带 I、Q 信号，交由基带芯片进行信号解调。低噪声放大器除了具有低噪声放大功能外，还具有旁路功能，用于提高接收增益动态范围。基带芯片可通过串行外围接口(serial peripheral interface, SPI)控制射频芯片的模拟增益，通过通用输入输出(general purpose input output, GPIO)口控制低噪放是否旁路。射频芯片的模拟增益可控动态范围为 1~65 dB，低噪放增益为 0(旁路)或 22 dB(不旁路)，整个接收链路可控增益动态范围为 1~109 dB。

由于射频前端和射频芯片自身存在非线性，加上射频电路板的寄生电容和电感等会对射频电路造成增益非线性。OFDM 调制信号本身峰均比很高，就导致短时间内统计计算出的功率会出现波动且与实际平均功率存在一定误差。在控制系统存在非线性及测量波动的情况下，采用线性控制算法可能会导致收速度慢或震荡等问题，最终造成不能在 AGC 帧头时间内完成 AGC 调整或输出信号时域峰均比变高，这些均会影响后续的基带解调。所以，为了避免器件非线性和测量波动对 AGC 控制造成的影响，可以先采用非线性算法将信号快速粗调至器件的线性区间。

图 2 所示控制结构的 AGC 控制算法和增益控制是通过中断程序完成的，该程序运行时间约数微秒。此外，射频前端和射频芯片收到控制信号后响应并稳定需要数微秒的时间。本系统 DFE 模块中断周期仅为 11 μ s，模拟器件和数字处理的时延将影响 AGC 收敛速度和稳定性。当信号出现突变，AGC 不能快速地根据幅度变化进行增益调整，导致信号出现冲击现象^[6]，抬高信号时域峰均比，从而造成信号失真影响基带解调。针对时延问题，在硬件方面需选用稳定响应快的射频器件和运算速度快的基带芯片。在控制算法方面也应特别关注时延问题，

既要计算简单、运行时间短，又要能应对时延带来的收敛速度和稳定性问题。

为了应对非线性、时延等问题，本系统 AGC 控制算法先使用模糊控制算法粗调，然后使用 PD 算法精调，用以提高算法的收敛速度和稳定性。

2.2 模糊控制粗调

模糊控制可以根据人的经验和实际情况制定合适的模糊规则，达到好的控制效果，核心原则是使系统响应时间和超调量都尽可能小^[7]。因接收前端模拟器件、射频芯片具有非线性特性，且 OFDM 调制信号具有较大峰均比，当信号在饱和区间时，AGC 控制算法先采用模糊控制进行粗调，快速将信号调整进线性区间。模糊控制以理想功率与实际功率偏差 E 作为输入变量，以模糊规则调整增益 ΔG 为输出变量。射频芯片的 ADC 位宽为 16 位，输出的数字信号最大功率为 96 dB，AGC 控制期望输出功率为 73 dB。因采用的 OFDM 调制信号的峰均比高，经实测 ADC 输出功率 82 dB 以上时即饱和，故设置输入变量的模糊论域均为 {9 23}，设置输出变量模糊论域为 {-18 -40}。输入变量与输出变量的模糊子集相同， $E=\Delta G=\{S M B\}$ ，分别为小、中、大。考虑到控制算法运算量及实时调整响应速度，选用三角形隶属函数，如图 3 和 4 所示。根据模糊控制的输入和输出变量的模糊子集，制定模糊控制规则，如表 1 所示。

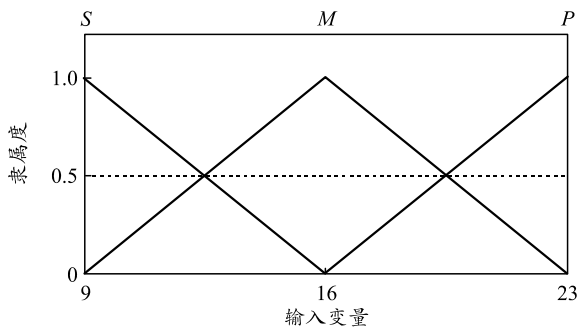


图 3 E 隶属函数

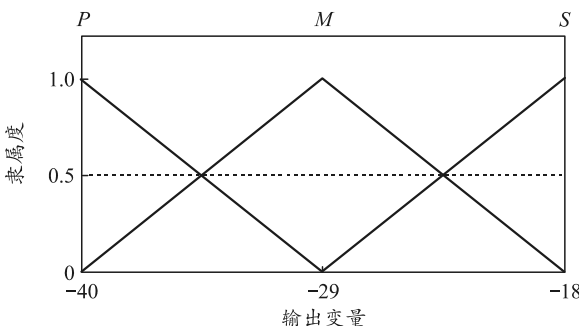


图 4 ΔG 隶属函数

表 1 模糊控制规则

E	S	M	P
ΔG	S	M	P

2.3 PD 控制精调

模糊控制将信号粗调进 ADC 线性区间后，需要进一步精调至理想值。精调一般采用比例控制即可，然而本系统具有较大时延滞后，采用比例控制容易产生震荡甚至不稳定。本系统采用比例微分 (PD) 控制，利用微分项预测误差变化趋势的能力，通过“超前”控制抵消滞后因素的影响，减小超调量，并增加系统稳定性。

PD 控制方法如下：

$$\Delta G(k)=K_P * E(k)+K_D *(E(k)-E(k-1))。 \quad (1)$$

式中： ΔG 为第 k 次输出； K_P 为比例系数； K_D 为微分系数； $E(k)$ 为第 k 次误差； k 为采样序列。

2.4 软件流程

数字中频数据流在基带的控制下进入 DFE 模块，当进入 DFE 模块的数据达到指定长度后，DFE 模块会计算这段数据的平均功率值，并产生中断，控制算法软件在中断中执行。DFE 模块计算平均功率的公式为：

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I(i) * I(i) + Q(i) * Q(i))。 \quad (2)$$

式中： μ 为平均功率； N 为计算数据的长度； $I(i)$ 为第 i 个 I 支路数据； $Q(i)$ 为第 i 个 Q 支路数据。 N 的大小决定了平均功率的计算准确性，当 N 越大时 μ 越准确。 N 的大小也决定了控制周期， N 越大控制周期越长。综合考虑平均功率的准确性和控制周期，本系统 N 设置为 256。

算法软件流程如图 5 所示。为了便于控制，先将 DFE 模块计算的线性功率值转换成单位为 dB 的功率值，随后判断功率是否处于理想区间，如果在理想区间则退出中断，否则需要调整增益。在调整增益前先判断功率是否在饱和区，如果在饱和区则采用模糊控制算法，否则采用 PD 控制算法。随后根据控制算法计算出的增益调整值控制射频前端和射频芯片增益，然后退出中断。

3 系统实验

在常温环境下搭建测试环境，测试流程如图 6 所示。将 2 个电台通过馈线和可调衰减器相连，其中电台 2 使用串口连接个人计算机 (personal computer, PC)，PC 可以使用软件通过串口监控电

台 2。控制电台 1 向电台 2 发送给定功率的调制信号，通过可调衰减器控制到达电台 2 的信号功率。在电台 2 接收过程中，PC 通过软件抓取电台 2 接收到的数据，使用 Matlab 对抓取的数据进行分析，并画出信号时域图和星座图。

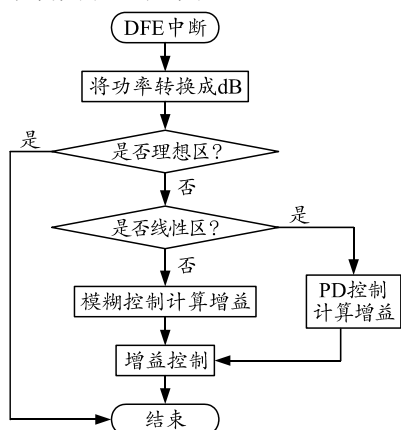


图 5 算法软件流程

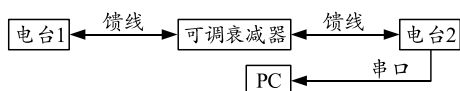


图 6 测试流程

实验结果表明：不论是 10 dBm 的大功率信号，还是 -98 dBm 的小功率信号，都能在 AGC 段内快速收敛，随后信号在时域上的功率波动都较小，如图 7 和 8 所示。解调后的星座图如图 9 和 10 所示，星座点随机分散在理想点周围。-98 dBm 星座图较接 10 dBm 差，是因信号信噪比低，属正常现象。

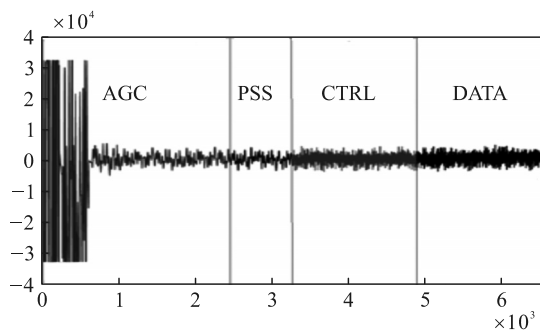


图 7 10 dBm 信号时域

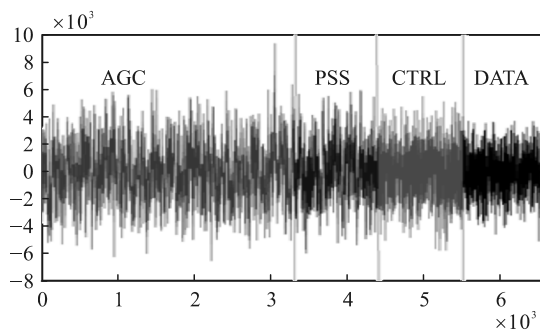


图 8 -98 dBm 信号时域

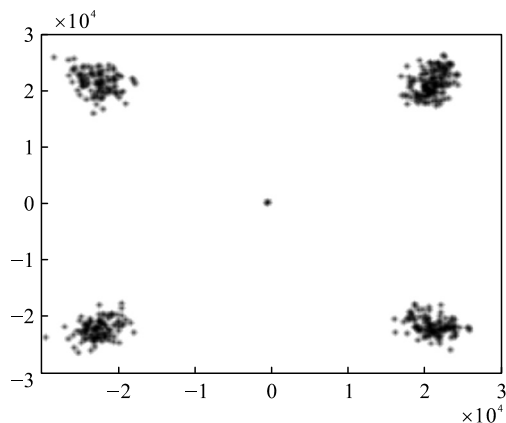


图 9 10 dBm 信号星座

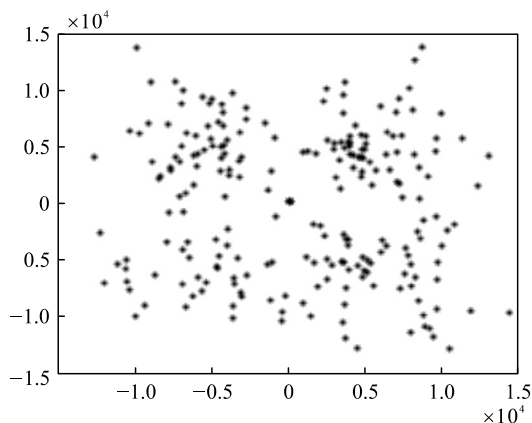


图 10 -98 dBm 信号星座

4 结束语

实验结果表明：笔者提出的基于模糊控制和 PD 控制的快速 AGC 控制方法，能够快速将平均功率为 -98~10 dBm 的空口信号调整到理想 ADC 量化区间内，具有一定的技术研究和工程应用价值。

参考文献：

- [1] 瑞普特, 蔡涛. 无线通信原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999: 50-52.
- [2] CESARI R. Estimate Dynamic Range for 3G A/DConverters[J]. Communication systems design, 2002(10): 27-32.
- [3] 沙学军, 何晨光, 吴玮, 等, 无线自组网组网与接入控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2016: 7-10.
- [4] 王栋. 一种大动态范围数字 AGC 快速控制算法[J]. 通信技术, 2023, 56(9): 1099-1106.
- [5] 孔杰, 李晓光, 张剑. 一种用于恒包络突发通信的快速 AGC 方案[J]. 通信技术, 2014, 47(10): 1223-1226.
- [6] 谢锡海, 盖海涛. 前馈式数字 AGC 系统设计与 FPGA 实现[J]. 中国科技论文, 2019, 14(11): 1198-1203.
- [7] TRABIA M, SHI L Z, HODGE N E. A fuzzy logic controller for autonomous wheeled vehicles[J]. In Tech, 2006.