

一种 OFDM 电力线通信系统的自动增益控制方法

周春良^{1,2},王连成^{1,2},迟海明^{1,2},郝 岩^{1,2},唐晓柯^{1,2}

(1. 北京智芯微电子科技有限公司 国家电网公司重点实验室 电力芯片设计分析实验室,北京 100192;
2. 北京智芯微电子科技有限公司 北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心,北京 100192)

摘 要: 低压电力线信道中普遍存在较大的脉冲噪声,这对 OFDM 电力线通信系统的自动增益控制(AGC)带来了极大的挑战。在分析电力线通信系统架构及脉冲噪声特点的基础上,提出了一种抗脉冲噪声能力强的自动增益控制新方法。该方法通过在自动增益控制中嵌入脉冲检测电路,在检测到脉冲噪声或系统帧同步时,停止增益调整,可有效防止脉冲噪声引起 AGC 误动作,降低接收过程中脉冲噪声对 AGC 的干扰。仿真结果表明,所提出的自动增益控制方法能有效提高电力线通信接收机的性能。

关键词: 电力线通信;自动增益控制;脉冲噪声;正交频分复用

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.01.014

引用格式: 周春良,王连成,迟海明,等. 一种 OFDM 电力线通信系统的自动增益控制方法[J]. 信息技术与网络安全, 2020,39(1):74-77,82.

A method of automatic gain control for OFDM PLC system

Zhou Chunliang^{1,2}, Wang Liancheng^{1,2}, Chi Haiming^{1,2}, Hao Yan^{1,2}, Tang Xiaoke^{1,2}

(1. State Grid Key Laboratory of Power Industrial Chip Design and Analysis Technology,
Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China;
2. Beijing Engineering Research Center of High-Reliability IC with Power Industrial Grade,
Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Large impulsive noise is common in low-voltage power line channels, which poses a great challenge to the automatic gain control (AGC) of OFDM power line communication (PLC) systems. Based on the analysis of the structure of PLC system and the characteristics of impulse noise, this paper proposes a new method of AGC with strong anti-impulsive noise capability. By embedding the impulsive detection circuit in the AGC, the method stops the gain adjustment when the impulsive noise or the system frame synchronization is detected, which can effectively prevent the AGC from malfunction caused by the impulsive noise, and reduces the interference of the impulse noise on the AGC during the receiving process. The simulation results show that the proposed AGC method can effectively improve the performance of PLC receivers.

Key words: power line communication; automatic gain control; impulsive noise; orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)

0 引言

随着泛在电力物联网的全面部署,电力线通信(Power Line Communication, PLC)因其建设成本低、覆盖范围广等优势,已成为电力本地通信中的主流技术^[1-2]。然而电力线最初是为输送电能设计的,信道环境极其恶劣,表现为多径干扰严重、衰减大、噪声显著,同时国内外低压电力线信道存在明显差异^[3],因此国内自研开发了相应的高速电力线通信技术标准^[4]。自研标准采用正交频分复用(OFDM)

的多载波调制,结合改进的信道编码与分集拷贝技术,具有良好的抗多径及噪声特性,但 OFDM 系统本身的性能容易受接收信号功率的影响,且电力线信道中普遍存在较大的脉冲噪声,这对电力线通信中的自动增益控制(AGC)带来了极大的挑战。

传统的 OFDM 系统广泛使用平均绝对误差的 AGC 结构^[5],其收敛速度与稳定性之间存在一定的矛盾;文献[6]、[7]在此基础上做了一些改进,但主要注重在接收的 OFDM 信号具有较大峰均比及较

大衰减范围下增益控制,没有考虑脉冲噪声对 AGC 的影响,其中文献[6]针对差分调制 G3-PLC 标准提出的先同步、后 AGC 的方法,在采用相干解调的高速电力线通信标准中,会降低同步的相关性能和信道估计的准确度。本文在分析高速电力通信系统架构及电力线信道中脉冲噪声特点的基础上,提出一种新的电力线通信自动增益控制方法,可有效提高脉冲噪声下电力线通信系统的性能。

1 系统架构与脉冲噪声特点

1.1 物理层帧结构

物理层帧结构如图 1 所示,由前导、帧控制和载荷数据组成^[4],其中前导是一个特殊的周期性序列,由 10.5 个正向同步符号(SYNCP)和 2.5 个反向同步符号(SYNCM)组成,每个符号都由 1 024 个采样点组成,前导符号无循环前缀,在开始与结束时会有滚降间隔。

1.2 物理层架构

物理层整体结构如图 2 所示,其发送和接收通路皆由数字基带及模拟前端组成。

1.3 脉冲噪声特点

电力线上脉冲噪声很常见,它是由整流器、开

关电源及电源开关瞬时启闭等引起的,可分为与工频同步的周期性脉冲噪声及与系统频率无关的单事件脉冲噪声两类,这两类噪声按微秒和毫秒级单位时变,严重时其功率会比背景噪声高出 50 dB。在脉冲发生时,一方面噪声会扩散到频域所有的子载波上且功率谱很高,很容易引起 OFDM 接收机中有限字长的时频变换 FFT 的饱和,导致数据传输中的突发错误;另一方面在强脉冲噪声情况下,如果 AGC 不采取有效措施来剔除脉冲能量,会直接引起增益反向调整,形成振荡,从而降低系统性能。

2 自动增益控制设计

2.1 设计原理

在 OFDM 电力线通信系统中,当接收信号功率过大时,会导致模数转换器(ADC)的输入信号溢出,产生截断效应降低接收机的性能;信号过小时则会增加量化失真,降低接收机的灵敏度,因此需要通过 AGC 来调整接收机的可编程增益放大器(PGA),使 ADC 的输入信号幅度调整到适合解调的最佳位置,达到充分利用 ADC 的动态范围、减少量化失真、提高 ADC 输出信噪比的目的。

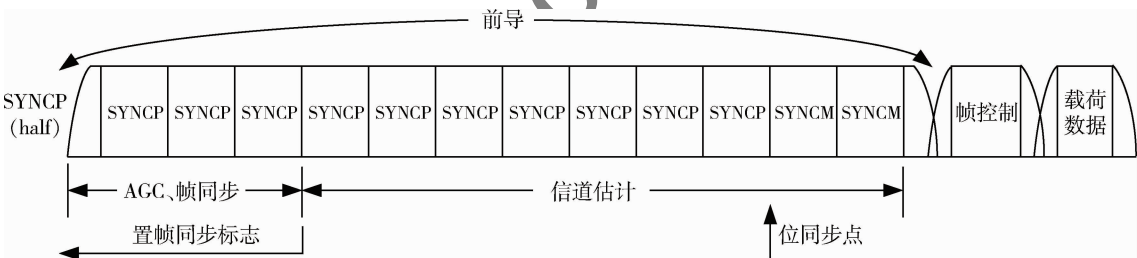


图 1 物理层帧结构

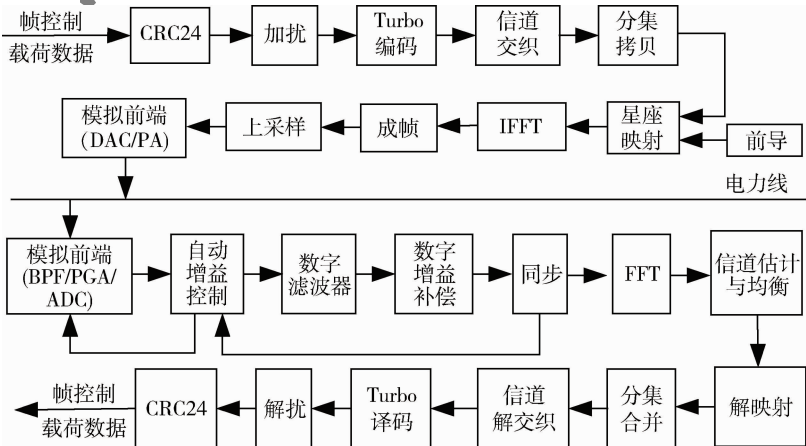


图 2 物理层整体结构

电力线通信采用突发传输方式,且电力信道是一种短时慢变信道,故在帧控制和载荷数据的 OFDM 符号中无导频或参考信号,接收机中的自动增益控制、定时同步与信道估计都是通过前导进行。如图 1 所示,在接收机中,采用前面 3~4 个 SYNCp 符号来同时做 AGC 及帧同步,保留尽量多 SYNCp、SYNcM 用于信道估计及位同步,以提高信道估计的准确度。

2.2 总体结构

AGC 总体结构如图 3 所示,由模拟前端、自动增益控制和同步三大模块组成。其中模拟前端由可编程增益放大器(PGA)和模数转换器(ADC)组成。同步模块用于确定帧的起始位置,分为帧同步与位同步两个过程。为了获得较好的性能并减少计算延迟,帧同步采用互相关的方式;为减少滑动互相关计算的复杂度,在帧同步时,截取 1 024 点 SYNCp 序列中一段相关性最显著的序列(短序列)作为本地的互相关序列,且采用二进制指数的表示方式来进行相关运算。帧同步通过计算接收信号与已知短序列的互相关,搜索周期性出现的序列互相关峰值位置,判断 SYNCp 的边界,并输出相应的帧同步标志。

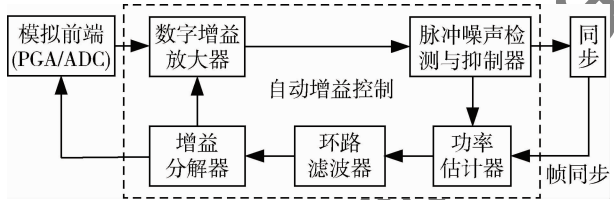


图 3 AGC 总体结构

2.3 数字增益放大器

数字增益放大器用于补偿模拟增益范围的不足,减少后续信号处理过程中的量化噪声。数字增益放大器通过一个固定的查找表来实现增益值(dB)到放大倍数的转换,若增益值超出数字增益放大器支持的最大增益范围,需先进行饱和操作。输入信号乘上放大倍数,再进行饱和操作后即数字增益放大器的输出。

2.4 脉冲噪声检测与抑制器

脉冲噪声检测与抑制器基于采样信号幅度与宽度及相应阈值来实时检测脉冲和识别大信号,实现简单,检测时只需少量的比较、计数与延迟运算;一旦检测到脉冲噪声,将会对脉冲噪声进行非线性

的限幅或置零操作,同时设置脉冲检测标志。

2.5 功率估计器

功率估计器无须缓存采样数据,如式(1)所示,直接将目标功率与每个输入采样点的功率相减,得到功率误差。

$$P_{err}(n) = P_{target} - P_{sig}(n) \tag{1}$$

在检测到脉冲和同步模块初步检测到帧同步时,置 $P_{err}(n)$ 为零,停止功率估计,防止同步前脉冲噪声及正常接收过程中突发噪声对 AGC 的干扰。

2.6 环路滤波器

环路滤波器借鉴自动控制理论中的比例-积分-微分(PID)控制^[8],通过比例调节来跟随功率误差的偏差,通过积分调节对功率误差进行积分,用于补偿比例调节中的静态误差,微分调节用于对功率误差的变化速度进行跟踪,考虑到电力线信道脉冲噪声很常见,微分调节容易产生振荡,故在 AGC 中采用比例-积分(PI)控制。如式(2)、(3)、(4)所示,P 控制对当前时刻的功率误差进行比例操作,I 控制从 0 时刻起对功率误差先进行积分操作,最后对 PI 操作后的增益值相加后进行定标(移位),去除分数部分增益。

$$P_p(n) = P_{err}(n) \times K_p \tag{2}$$

$$P_{acc}(n) = P_{acc}(n-1) + P_{err}(n) \times K_I \tag{3}$$

$$P_{gain}(n) = (P_p(n) + P_{acc}(n)) \gg L_{frac} \tag{4}$$

其中, $P_{acc}(0) = 0$, K_p 、 K_I 分别为可配置的环路积分系数和比例系数, L_{frac} 为分数字长。

2.7 增益分解器

增益分解器把环路滤波器输出增益 $P_{gain}(n)$ 分解为模拟增益与数字增益两部分,如果 $P_{gain}(n)$ 在 PGA 最大值增益范围内,则数字增益为 0 dB,否则,超出部分为数字增益值。模拟增益值经过一个可编程的查找表(进行增益值到 PGA 控制字的转换)后输出给模拟前端的 PGA,数字增益值直接输出给数字增益放大器。

3 仿真测试

PLC 标准在 12 MHz 工作频段内定义了多个通信频段。仿真采用实际现场常用的通信频段 1 (2.441~5.615 MHz),参数设置如表 1 所示。

仿真环境如图 4 所示,发送机和接收机采用图 2 的模型。电力线信道采用加性高斯白噪声(AWGN)和脉冲噪声(IMP)相结合的信道,信道衰减分别为 20 dB、25 dB、30 dB、35 dB 和 40 dB,脉冲

表 1 仿真参数设置

仿真参数	参数内容	仿真参数	参数内容
工作频段	频段 1	子载波间隔	24.414 kHz
FFT 点数	1 024	分集拷贝模式	TM14
物理块类型	136 B	分集次数	7
调制方式	BPSK	码率	1/2
帧控制符号	12 个	物理块个数	1 个

噪声模拟载波芯片过检的测例,采用周期为 10 μ s、持续时间为 1 μ s、幅值 $V_{pp}=4$ V 的方波信号(仿真时按 PGA 的 V_{pp} 进行归一化)。模拟带通滤波器^[9](图 2 中的 BPF)采用浮点数字带通滤波器代替,模拟前端 DAC、PA、PGA、ADC 采用理想模型,ADC 只考虑量化噪声。

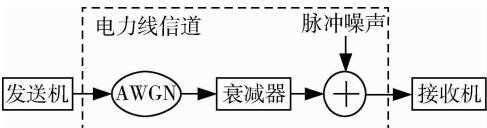


图 4 仿真环境

在仿真 AGC 对接收机性能影响时,分为有脉冲检测及帧同步辅助的 AGC(本文方法)与无脉冲检测及帧同步辅助的 AGC(与现有 AGC 方法类似,现有方法)两种情况。仿真采用不同衰减情况下 AWGN 信道下的信噪比与误包率来表征 AGC 对接收机性能的影响,详细的 SNR 对 PER 的性能曲线如图 5、图 6 所示。从图中可以看出,在衰减较小时,本文方法略好于现有方法,随着衰减值的增大,特别是在较强脉冲噪声(40 dB 衰减)情况下,两种方法下的 SNR 性能相差 8 dB 以上。由此可见,本文提出的基于脉冲检测及帧同步辅助的 AGC 能有效提高强脉冲噪声环境下接收机的性能。

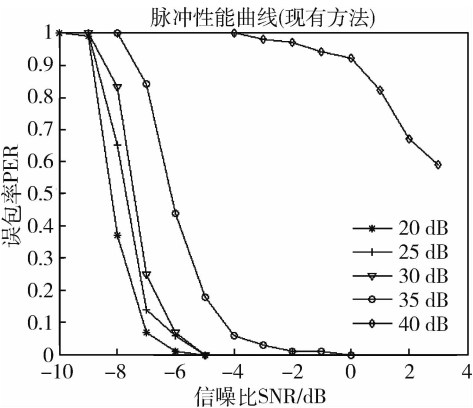


图 5 现有方法

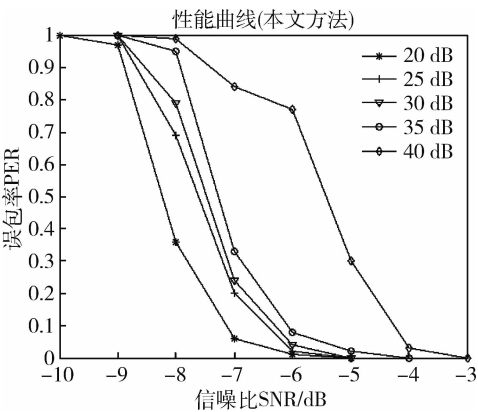


图 6 本文方法

4 结论

本文针对 OFDM 电力线通信提出了一种抗脉冲噪声强的自动增益控制方法。该方法针对电力线信道普遍存在的脉冲噪声,通过在 AGC 中嵌入脉冲检测电路,在检测到脉冲时,停止 AGC 的增益更新,可有效防止脉冲噪声引起 AGC 的误动作;同时针对电力线信道短时慢变特性以及电力线通信突发传输的特性,通过把 AGC 与帧同步相结合,可有效降低正常接收过程中噪声对 AGC 的干扰。本文提出的自动增益控制方法,能有效提高电力线通信接收机的性能,具有较高的工程实用价值,已成功应用于用电信息采集系统的宽带电力线通信芯片^[10]中,对提高智能用电环节通信技术水平有重要的参考意义。

参考文献

[1] 董建波,于希永,藏志斌,等. 基于电力线宽带载波及用电信息采集系统的多能源表计采集的研究[J]. 供用电,2016,33(11):11-16.

[2] 刘庆扬,林大朋,何业慎,等. 中频电力线宽带通信在用电信息采集系统的应用研究[J]. 供用电,2014,31(8):28-33.

[3] Liu Jianming, Zhao Bingzhen, Geng Liang, et al. Current situations and future developments of PLC technology in China[C]. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications,2012:60-65.

[4] 国家电网公司. 低压电力线宽带载波通信互联互通技术规范第 4-1 部分:物理层通信协议[S]. 2017.

[5] JIMENEZ V P G, GARCIA M J F G, SERRANO F J G, et al. Design and implementation of synchronization and AGC for OFDM based WLAN Receivers[C]. IEEE Transactions on Consumer Electronics,2004,50:1016-1025.

(下转第 82 页)

- veloperworks/cn/linux/1506_cgroup/.
- [5] 张辉宜,赵海军,周秀丽. 基于 Pfair 的分布式实时调度策略 Linux 下实现[J]. 计算机技术与发展,2008,18(2):31-33.
- [6] HAMANN A, HENIA R, RACU R, et al. SymTA/S-Symbolic timing analysis for systems[C]. Proceedings of the 16th ECRTS. Catania:IEEE Press,2004:17-20.
- [7] DROZDOWICZ M, GANZHA M, PAPRZYCKI M. Semantic policy information point-preliminary considerations[C]. ICT Innovations 2015. Springer International Publishing,2016:11-19.
- [8] LÊ L S, WEGMANN A. Hierarchy-oriented modeling of enterprise architecture using reference-model of open distributed processing[J]. Computer Standards & Interfaces,2013,35(3):277-293.
- [9] HAMANN A, JERSAK M, KAI R, et al. A framework for modular analysis and exploration of heterogeneous embedded systems[J]. Real-Time Systems, 2006, 33(1-3):101-137.
- [10] BINI E, BUTTAZZO G, LIPARI G. Minimizing CPU energy in real-time systems with discrete speed management[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems,2009,8(4):167-176.
- [11] PRIETO A G, STADLER R. Adaptive real-time monitoring for large-scale networked systems[C]. IFIP/IEEE International Conference on Symposium on Integrated Network Management. IEEE Press,2009:790-795.
- [12] LAZOUSKI A, MARTINELLI F, MORI P. Usage control in computer security: a survey[J]. Computer Science Review,2010,4(2):81-99.
- [13] DAMIANOU N, DULAY N, LUPU E, et al. Ponder: a language for specifying security and management policies for distributed systems[R]. Imperial College Research Report,2000.
- [14] DIMMOCK N, BELOKOSZTOLSKI A, EYERS D, et al. Using trust and risk in role-based access control policies[C]. Proceedings of the Ninth ACM Symposium on Access Control Models and Technologies,2004.

(收稿日期:2019-10-23)

作者简介:

纪一方(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向:计算机网络、虚拟化技术。

张国敏(1979-),男,博士,副教授,主要研究方向:网络体系结构、网络空间安全。

邢长友(1982-),男,博士,副教授,主要研究方向:网络体系结构、网络空间安全。

(上接第 77 页)

- [6] 赵慧冬,黑勇,乔树山. OFDM 电力线通信系统的自动增益控制方法[J]. 科学技术与工程,2012,12(19):4559-4662.
- [7] 何世彪,杨迷,张青,等. OFDM 电力线载波通信系统的 AGC 实现[J]. 世界科技研究与发展,2013,35(6):720-722.
- [8] 鲍飞鸿,车珊,秦风,等. 基于 PID 方法的自动增益控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2016,14(1):112-116.
- [9] 周春良,周芝梅,樊文杰,等. 电力专用宽带电力线载波通信芯片的设计与应用[J]. 微型机与应用,2017,36(11):34-36,43.
- [10] 周春良,周芝梅,杨晓平,等. 宽带电力线通信芯片的低功耗设计[J]. 电子技术应用,2017,43(10):16-19.

(收稿日期:2019-09-25)

作者简介:

周春良(1977-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:通信芯片与系统实现。

王连成(1968-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:集成电路设计。

迟海明(1983-),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力线载波通信算法。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所