



电力载波通信中的干扰特性及抑制技术分析

张高境,熊兴中

(四川理工学院,四川 自贡 643000)

摘要:电力线除了向用电设备提供电能外,也可以作为传输信息的通信系统。可靠、高效地传输信息是任何一种通信网络的基本要求,对电力载波通信信道动态负载效应的阻抗特性、多径效应的衰减特性、脉冲噪声的干扰特性等问题进行了分析研究,并从物理层的信号处理以及数据链路层的数据传输角度,分析了几种典型的抑制电力载波通信干扰技术的可行性,进而为探寻有效的抑制电力载波通信脉冲干扰的技术提供了有益的参考。

关键词:电力载波通信;脉冲干扰;正交频分复用;交织多址;分数低阶统计信号

中图分类号: TN914

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016041

Interference characteristics and suppression techniques in power line communication

ZHANG Gaojing, XIONG Xingzhong

Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China

Abstract: Power line can provide electrical energy to the electric equipment, and it can also be used as a communications system for transmitting information. The reliable and efficient information transmission is the basic requirement of any kind of communication network. Based on the research of dynamic load impedance characteristic effects, attenuation characteristics of multipath effect and impulse noise interference characteristics, the feasibility of several typical inhibition technologies were analyzed, from perspective of the physical layer signal processing and the data link layer data transmission, which provided valuable reference for exploring effective technologies of pulse interference suppression in the power line communication.

Key words: power line communication, impulse interference, OFDM, IDMA, fractional lower order statistics signal

收稿日期:2015-06-26;修回日期:2015-12-15

基金项目:四川省省属高校科研创新研究团队项目(No.13TD0017);智能信号与信息处理四川省青年科技创新研究团队项目(No.2015TD0022);四川理工学院人才引进项目(No.2014RC13);四川理工学院研究生创新基金资助项目(No. y2014013)

Foundation Items: Innovation Team Build Plan for the Universities in Sichuan (No.13TD0017), Intelligent Signal and Information Processing Innovation Research Team of Sichuan Province (No.2015TD0022), Talents Project of Sichuan University of Science and Engineering (No.2014RC13), Supported by The Innovation Fund of Postgraduate, Sichuan University of Science & Engineering (No.y2014013)

1 引言

PLC(power line communication, 电力线通信)是传统的电力网络和通信技术的融合,是通过电力线载波传输数据和语音信号的通信方式。该技术无需布线,避免了建筑物及公共设施的破坏,具有广泛的应用前景,已成为通信领域的研究热点。但 PLC 信道特别复杂,信号在 PLC 拓扑网络结构中突然接入/切出时更是如此,其阻抗的变化并不一定随着频率的增大而单调减小,甚至与之相反,同时,产生的脉冲噪声严重损害了 PLC 的通信质量。电力线并非专为通信服务所设计,PLC 系统中存在的干扰影响了通信质量,因此抑制干扰是确保 PLC 系统可靠性传输的前提。

抗干扰技术的选择主要取决于传输媒介的特性,在 PLC 中必须考虑到信道的噪声干扰、多径效应和信道衰落等因素。其中,PLC 拓扑网络产生的多径效应和切换信号产生的脉冲噪声将影响 PLC 高速数据传输的质量,本文从物理层、数据链路层以及 OSI/ISO 网络模型等进行抗干扰性能的分析。扩频技术抗窄带干扰能力强,但是参考文献[1]提出的改进的跳频系统由于传输速率较低,不适合于传输速率高的 PLC,于是人们提出了基于 OFDM 的多载波技术。参考文献[2]提出了基于 OFDM 的 TDMA 系统,一个时隙内携带的 OFDM 符号必须是一个整数,一个 OFDM 符号承载一定量的数据载荷,由于 PLC 网络容量的局限性,使 OFDM 符号的有效载荷被降低;参考文献[3]提出了基于 OFDM 的 FDMA 系统,FDMA 有抗窄带干扰的顽健性,OFDM 又是 PLC 首选抗干扰技术,因此 OFDMA 成为 PLC 网络中的多址接入方案之一。但 OFDMA 方案可看作总资源在频率上进行分割,不同

用户使用不同子载波,对频宽有一定要求,而且在使用 FEC(forward error correction, 前向纠错)技术时系统设计特别复杂。参考文献[4]针对传统调制技术的抗干扰性能不足,提出了基于 OFDM 的 CDMA 方案,继承了扩频技术的优点,如数据符号经过扩频布满子信道、提供频率分集利用、扩频码被分配到不同用户提供多重接入等,在无线通信中得到越来越多的重视。多载波 CDMA 方案也在 PLC 中得以应用^[5],但在 PLC 频率选择性衰落的信道中,所有用户同时使用所有子载波,每个子载波经历不同衰落,接收信号可能失去码字的正交性,这就意味着必须用复杂的均衡机制来恢复 PLC 频率选择性信道破坏的编码的正交性。

综上所述,现有的抗干扰技术在应对 PLC 中的干扰时都有一定的局限性,针对这一问题,围绕增强抗干扰的能力,结合多址接入方案和数据链路层的有关纠错机制,探寻适合于 PLC 信道环境并能抑制相应干扰的技术,以确保电力载波通信系统的可靠性和稳定性。

2 干扰特性分析

电力线载波通信系统主要由电力线载波机、电力线和耦合设备等构成,如图 1 所示。该系统是各类干扰存在的载体,从阻抗特性、衰减特性、噪声特性等方面对其进行分析,为抑制相应干扰奠定基础。

2.1 阻抗特性

电力线网络总阻抗主要由 3 部分组成:变压器产生的阻抗、导线的特性阻抗(主要由材料和结构决定)、电力线上的负载阻抗。这些阻抗有的呈感性,有的呈容性,需要达到共轭匹配^[6]。它们并不是单一作用在线路中,而是几种阻抗的动态负载效应,即负载之间的阻抗匹配、变压器跟电

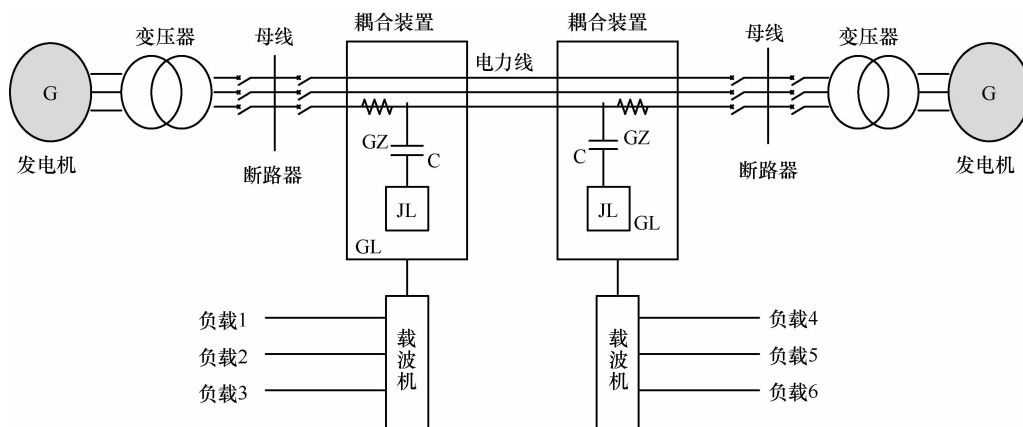


图1 电力线载波通信系统架构



力线特性阻抗的匹配、负载跟耦合装置的阻抗匹配等。静态可以看成频率为零时的动态的特例,此时的阻抗不再是简单的电阻,而是广义的阻抗,具有动态效应。阻抗匹配问题关系到 PLC 信号的完整传输,新添负载使得输入阻抗随 PLC 网络结构变化而变化,电线接头间的阻抗不匹配引起的反射多样性增加,导致原有的阻抗匹配重新打乱,多径模型随之变化,信号传递受到干扰。

2.2 信道衰减特性

PLC 信道衰减主要指耦合衰减和线路衰减,耦合衰减可以根据要求改变耦合器内阻值来克服,线路衰减是面临的主要问题。PLC 信道的时变性很强,信号随传输距离和频率的变化而变化,频率越高,传输线的效应就越明显,当 PLC 网络拓扑结构及负载的特征参数不同时,很难找到适应所有线路的数学模型。Zimmermann M 和 Dostert K^[7]多次测量表明,多径反射是 PLC 信道中信号衰减的主要原因。考虑到输入阻抗的变动和多径效应的影响,结合权重、衰减和时延等因素,PLC 信道模型的表达式如下:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) l_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

其中, g_i 是路径 i 上与反射和传输系数相关的权重因子,一条路径上的转移和反射越多,加权因子就越小; $e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 f^k) l_i}$ 是电力线引起的衰减, k 是电力线的相关参数(如特征阻抗和传播常数等),衰减因子 α 与路径的长度 l 和 f 频率成正比; τ_i 是同一信号多径路径 i 上的传输时延,与传播距离和速度有关。

根据式(1),把电力线信道考虑成具有频率选择性衰落的多径传输模型是符合实际理论分析的^[7],不过,对每个路径的时延、幅度和相位的计算估计量非常大,会存在着一定的误差;参考文献[7]提出的多径信道模型仅仅是时域的描述,如果要完整刻画信道特性,需要考虑动态路径的多种情况,并且负载不同、路径不同,得到的动态信道模型也不同,最优模型很难实现。参考文献[8]提出了另一种描述方式,即首先对电力线传输等效电路中的差分和成对传输模式进行推导,其结果用 2PN(two-port network,级联双端口网络)的形式进行描述,获得了等效的 2PN 信道描述,PLC 传输链路就可以用 ABCD 矩阵进行描述了,此时参数很容易获得,也能对拓扑结构的时变性进行分析。但 PLC 环网结构的传递函数用简单的级联来描述比较理想化。

此外,参考文献[9]提出了电力线通信组网的改进分级蚁群路由算法,能够适用于未知的、时变的、多样的 PLC 网络物理拓扑机构,通过实验证明了该算法的抗毁性,能够实现 PLC 网络的自我修复能力,实现网络的重构,保证不因个别节点故障影响其他通信,也能迅速找到最优线路,即受噪声干扰最小、通信距离最短线路,提高了通信信道的可靠性。在 PLC 网络规模较大时,最优线路搜索比较耗时,因此节点的分组以及选取是关键。PLC 网络的规模及时延要求会造成通信系统的负担。

2.3 信道噪声特性

电力线网络的设备种类繁多,性质各异,将噪声按照起因、持续时间、频谱等可分成 5 类,即有色背景噪声、窄带噪声、同电网频率不同步的周期脉冲噪声、与电网频率同步的周期脉冲噪声、非同步脉冲噪声等。有色背景噪声、窄带噪声、同电网频率不同步的周期脉冲噪声平均功率较小,有可能在长时间内保持稳定,很可能覆盖整个信号频谱,统称 PLC 的背景噪声^[7,10]。

脉冲噪声主要由与电网频率同步的周期脉冲噪声和非同步脉冲噪声构成,非同步的脉冲噪声起着主导作用,随机性强,能量集中,频谱很宽,往往是时间短、能量大的脉冲干扰或者脉冲干扰群,是 PLC 系统最棘手的问题,如电器开关的断开、雷击等。必须经过大量研究和测量,找出脉冲噪声的时频特性。脉冲噪声类的脉冲模型如图 2 所示。参考文献[11]提出脉冲持续时间和间隔时间都可以用两个呈负指数分布的随机变量来表示,而这些随机变量由脉冲行为所决定。脉冲序列模型函数在知道脉冲持续时间及间隔统计特性的情况下很容易得到,如式(2)所示。

$$n_{\text{imp}}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_i p\left(\frac{t - t_{a,i}}{t_{w,i}}\right) \quad (2)$$

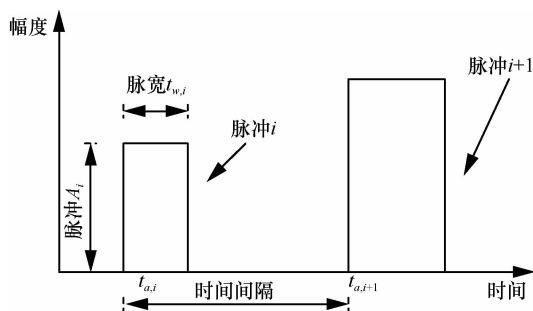


图 2 脉冲噪声类的脉冲模型

脉冲 i 的参量 t_{wi} 、 A_i 和 t_{di} 是随机变量, Zimmermann 曾用统计的方法近似研究和测量, 测量结果显示, 90% 的脉冲幅值在 100~200 mV, 只有大约 1% 的脉冲宽度超过了 500 μ s, 90% 的脉冲间隔在 200 ms 以下。脉冲间隔在 200 ms 以上的脉冲, 其间隔时间呈指数分布。参考文献[12]在 PLC 传输信道加入 T_{ON} 和 T_{OFF} 两个开关模型, 可以根据脉冲噪声的持续时间及时间间隔启动 T_{ON} 或者 T_{OFF} , T_{OFF} 代表脉冲干扰造成信道不可用期间, T_{ON} 代表没有脉冲干扰期间。高强度的脉冲噪声对信号的传输破坏力极大, 如果持续时间过长, 超过使用纠错码能容忍的检测和改正时间限度时, 会产生严重的突发错误。仅用统计方法确定脉冲函数模型是片面的, 而且脉冲的产生源不同, 其特性、频谱能量也要考虑, 不再仅仅是单一的 T_{ON} 或者 T_{OFF} 。

3 PLC 中的抗干扰性能分析

为了实现 PLC 网络中的信息交换, 无论是下行接收还是上行传输, 只有把物理层和数据链路层的抗干扰技术以及 MAC 协议和纠错机制的多种抗干扰方案进行结合, 才能确保最优传输, 基于 OSI/ISO 的抗干扰模型如图 3 所示。

3.1 基于物理层调制/解调抗干扰分析

电力线信道的非线性使得解调非常复杂, 复杂均衡技术还会导致成本上升。传统的调制技术在应对 PLC 随参信道中的脉冲干扰及多径效应方面已经不占优势; 受发射信号功率的影响, PLC 调制方案以尽可能低的信噪比实现可接受误码率, 而扩频技术正是经频谱扩展后以低功率频谱信号再发射, 对电台及空中短波辐射产生的离散频谱窄带干扰有很好的抑制效果, 有可秘密通信、抗噪声和衰减能

力强等优点。但是, 信号频谱被扩展得越宽, 有限带宽下可用的信道数量越少, 同等的码元在数量少的信道中传输, 传输速率受到影响; 此外, 扩频技术在处理频谱很宽的脉冲噪声时, 小幅度的扩频信号易淹没在宽频带的噪声中, 造成信号接收错误, 可采用 FEC 技术进行检错及纠错, 但信道编码引起的信号频带的再次扩展必定导致扩频增益降低。因此扩频技术在高速 PLC 中的应用受限。

OFDM 技术有较高的频谱利用率, 传输速率快, 适合高速 PLC 的发展要求, 而且抗多径干扰和脉冲干扰有一定优势, 具体如下。

(1) OFDM 传输速率快

在将频带分成相互独立的窄带信道的同时, 也把高速的串行码转换成了并行的低速码, 然后用这些低速码流调制子载波, 子载波部分频谱重叠, 大大提高了频谱利用率, 虽然子载波的传输速率不高, 但经过子信道累加后可以获得较高的传输速率。

(2) OFDM 抗多径干扰能力强

PLC 信道的多径效应会造成信号的时延扩展, 导致前后码的接收重叠, 造成 ISI (inter symbol interference, 码间干扰)。设信号带宽为 B , 码字周期为 T , 码字速率为 R , 多径效应引起的最大扩展时延为 $T_{\max}$, 当 $T_{\max} > T$ 时, 引起码间干扰。OFDM 能够将高速的串行数据分割成 N 个子信号, 分割后速率减小为 R/N , 周期为 NT , 周期延长了 N 倍, 大于多径反射的时延, 对克服 ISI 有一定的效果; 如果彻底消除 ISI, 必须插入保护间隔, 以保证大于信道脉冲响应的持续时间; 但空白的保护间隔在 PLC 多径传播的影响下, 子载波的正交性遭到破坏, 造成 ICI (inter-carrier interference, 载波干扰), 若保护间隔内植入循环前缀符号, 即将 OFDM 符

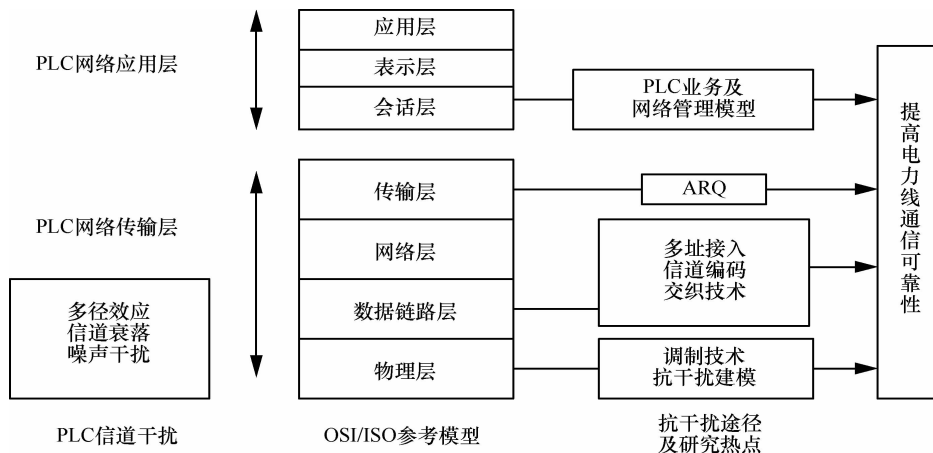


图 3 基于 OSI/ISO 网络模型的抗干扰模型



号的后半部分复制到 OFDM 符号前半部分,就形成了 CP (cyclic prefix, 循环前缀),既保证了子载波的正交性,又避免了 ICI。

(3) OFDM 能够抑制一定的脉冲干扰

子载波的调制方式可根据子信道的不同情况进行选择,脉冲干扰严重时,将低于信噪比门限的子信道关闭,可以保证数据完整性和合适的误码率。

在 PLC 系统中,虽然 OFDM 对发射机的频率偏移敏感且面临 PAPR (peak to average power ratio, 峰值平均功率比)大的风险,上行链路受到的 PAPR 比下行链路更严重,参考文献[13]提出了一种单载波频分复用(SC-FDMA)技术,能够很好地解决 OFDM 上行链路传输带来的均峰比问题。基于 CP 的添加,使得传输速率降低,参考文献[14]提出了一种 m 序列作为训练序列的信道估计与迭代均衡方案,利用自相关特性获得信道的时域响应,进而对 OFDM 进行迭代均衡,仿真实验表明,可提高传输效率和增强系统抗噪性能。但对时间同步和载波同步都有很高的要求,硬件设备较复杂。参考文献[15]提出了针对电力通信同步问题采用多相序列作为主同步信号的多用户帧结构,可以根据不同用户采用不同同步序列,相关性强,适合用于多用户电力线网络。

3.2 基于数据链路层抗干扰分析

3.2.1 FEC 与交织技术

PLC 信号传输时,其发射功率受到电磁兼容限制,发射功率低,信噪比受到影响,一定的信噪比能够克服背景噪声,但对脉冲噪声无法克服。FEC(主要指信道编码)和交织技术对脉冲噪声有一定的遏制能力。

信道编码能提高通信质量,接收端不需要发送端提供额外的信息,待发信息在发送前附加一些冗余位,接收时,这些冗余信息就会通过一定的规律把错误纠正过来,常用的纠错码有分组码、卷积码、Turbo 码等。信道编码能处理随机性错误,而 PLC 的脉冲噪声造成的频率响应偶尔会发生严重衰落,造成突发性错误而不是随机性错误。交织技术能使突发错误随机化,从而抑制脉冲干扰。参考文献[16]通过将交织器和递归系统卷积编码器结合,确保 Turbo 编码器能输出较大的码重。1995 年 MacKay 和 Neal 等人在 Turbo 码基础上重新对 Gallager 在博士论文中提出的 LDPC 进行了研究,LDPC 是一个线性分组码,校验矩阵为稀疏矩阵,研究表明不规则的 LDPC 甚至比 Turbo 码的性能好。参考文献[17]提出 PLC 信道模型下采用

注水原理,避免了信噪比分布不同,使得发送端获得 PLC 信道状态信息,很容易实现 LDPC 的分配。考虑到 PLC 网络的互联网电视协议,高质量的视频必须有应用层的纠错机制保证,否则,脉冲干扰引起的突发错误使得通信难以进行^[18]。

3.2.2 多址接入技术

多址接入技术中的 CDMA 方案在 PLC 中有很好的优势。CDMA 不但继承了扩频技术的优点,而且频率利用率高、传输速率快。2002 年香港城市大学的 Li P 教授提出了 IDMA (interleave division multiple access, 交织多址)方案^[19],继承了 CDMA 系统抗干扰性好、抗多径衰落能力强等优势,而且交织能力使脉冲噪声产生的突发错误随机化,能在 PLC 频谱资源受限、干扰严重的信道上继续传输信号,增加了利用率,为用户提供更好的服务。此外,脉冲调制结合 CDMA 方案允许高数据传输下实现简单的多用户传输,具有抗 PLC 信道频率选择性衰落、脉冲干扰的顽健性^[20],虽然没有大量研究,但脉冲调制在 PLC 中的应用仍具有潜力。因此,是 IDMA 与 OFDM 结合还是 CDMA 与其他技术结合更适应 PLC 信道特性,还有待进一步研究。

3.3 基于传输层抗干扰分析

经过上述分析,OFDM 系统设计的每个子载波较窄,产生平坦衰落,插入 CP 能保证经频率选择信道后保持正交,但带宽增加,每个子载波经历的衰减不同,不再是平坦的衰落,有可能发生错误,可以通过 FEC 来检错及纠错。如果使用物理层调制技术和 FEC 等一些应对干扰的措施后仍出错,只能使用 ARQ (automatic repeat-request, 自动请求)机制重传。通常 ARQ 和 FEC 一起使用,从而降低整个系统的错误概率。但 ARQ 适用于对时延没有苛刻要求的系统,否则会增加额外的时间,无法满足系统的要求。当然,ARQ 不断地重复发送,通信效率也会降低,比较适合处理时间较短的干扰,如信号接入/切出产生的短暂脉冲干扰,如果遇到持续时间较长的脉冲干扰群,必须根据数据传输速率和 QoS 的要求重新在 PLC 的 MAC 层分配信道。

4 结束语

PLC 信道环境十分复杂,为了提高通信质量,确保 PLC 网络的可靠性,对电力载波通信信道动态负载效应的阻抗特性、多径效应的衰减特性、脉冲噪声的干扰特性等问题进行了分析研究,并从物理层的信号处理以及数据链

路层的数据传输角度,分析了几种典型的抑制电力载波通信干扰技术的可行性方案。

然而,除了抗干扰技术的选择,算法的韧性也是 PLC 必须要考虑的问题,分数低阶统计信号在通信系统中的应用已有广泛的探讨^[21,22]。分数低阶 α 稳定分布既可以描述成高斯信号,又可以是尖峰特性的非高斯信号。这类非高斯信号概率密度函数都具有厚重的“拖尾”分布,时间波形上有显著的脉冲特性,能很好地描述地震噪声^[23]、水声信号^[24]、大气信号^[25]等,同样,如果将 PLC 中的脉冲噪声建成非高斯噪声模型,用分数低阶 α 稳定分布进行描述,则相应的抑制干扰的算法就更具有普适性,探讨分数低阶统计信号在 PLC 中的应用也是非常重要的问题。另外,针对 PLC 动态阻抗特性以及信号在 PLC 拓扑网络结构中突然接入/切出等因素导致的多径传输的动态化建模也是值得研究的问题。

参考文献:

- [1] WALDECK T. Einzel-Und Mehrtragerverfahren Für Die Stresistente Kommunikation Auf Energieverteilnetzen [M]. Berlin: Logos-Verlag, 1999: 111-135.
- [2] LINDNER J. MC - CDMA in the context of general multiuser/multi-subchannel transmission methods[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(4): 351-367.
- [3] PAUL A, JOSE I. UWB modulation scheme “SC-CFDMA” for multi-user communications [C]//11th Institute of Research and Journals International Conference, January 12, 2014, Chennai, India.[S.l. : s.n.]:2014:34-37.
- [4] WANG J B, CHEN M, WANG J Z. Adaptive channel and power allocation of downlink multi-user MC-CDMA systems[J]. Computers and Electrical Engineering, 2009, 35(5):622-633.
- [5] CRUSSIÈRE M, BAUDAIS J Y, HELARD J F. Adaptive spread-spectrum multicarrier multiple-access over wirelines [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(7): 1377-1388.
- [6] OKSMAN V, ZHANG J. GHNET: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(12):36-44.
- [7] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the power line channel [J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50(4), 553-559.
- [8] MATANZA J, ALEXANDRES S, RODRIGUEZ-MORCILLO C. Performance evaluation of two narrowband PLC systems: PRIME and G3 [J]. Computer Standards & Interfaces, 2013, 36(1): 198-208.
- [9] 张良,刘晓胜,戚佳金,等. 一种低压电力线通信改进分级蚁群路由算法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 318-324.
ZHANG L, LIU X S, QI J J, et al. Study of improved hierarchical ant colony routing algorithm for low-voltage power line communication [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):318-324.
- [10] WANG W Y, XU Y, KHANNA M. A survey on the communication architectures in smart grid[J]. Computer Networks, 2011, 55(15): 3604-3629.
- [11] BENYOUCEF D. A new statistical model of the noise power density spectrum for powerline communications [C]//The 7th International Symposium on Power-Line Communication and Its Applications(ISPLC), March 26-28, 2003, ANA Hotel Kyoto, Kyoto, Japan. Kyoto:[s.n.], 2003: 136-141.
- [12] HRASNICA H, HAIDINE A. Modeling MAC layer for powerline communications networks [C]//Internet Quality and Performance and Control of Network Systems, 2000, Boston, MA, USA. [S.l.]: Proc Spie, 2000: 70-81.
- [13] JI J, REN G, ZHANG H. PAPR reduction in coded SC-FDMA systems via introducing few bit errors [J]. Communications Letters, IEEE, 2014, 18(7): 1258-1261.
- [14] 韩谷静,秦亮,殷小贡,等. 一种正交频分复用低压电力线通信系统的信道估计与迭代均衡策略 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 91-96.
HAN G J, QIN L, YIN X G, et al. A channel estimation and iterative equalization scheme OFDM in low-voltage power-line communication system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(28): 91-96.
- [15] 梁栋,张保会,牛东文,等. 用于多用户宽带电力线通信的同步信号的设计与实现 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 197-205.
LIANG D, ZHANG B H, NIU D W, et al. Design and implementation of the synchronization signal based for multi-user broadband power line communications [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(1): 197-205.
- [16] GAROUSHI V. Methods to reduce memory requirements of Turbo codes[D]. Canada: University of Waterloo, 2003:13-25.
- [17] ESMAILIAN T, KSCHISCHANG F R, GULAK P G. In-building power lines as high speed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble [J]. International Journal of Communication Systems, 2003, 16(5): 381-400.
- [18] SHOKROLLAHI A, WATSON M, LUBY M, et al. Raptor Forward Error Correction Scheme for Object Delivery: RFC5053 [R]. [S.l.]:IETF, 2007.
- [19] LI P, GUO Q H, TONG J. The OFDM-IDMA approach to wireless communication systems [J]. IEEE Wireless Communications, 2007, 14(3): 18-24.



- [20] TONELLO A M. Wide ban impulse modulation and receive algorithms for multiuser power line communications[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2007(1): 096747.
- [21] 熊兴中, 胡剑浩. 分数低阶统计信号在通信抗干扰中的应用及研究进展[C]//中国通信学会第五届学术年会论文集, 2008, 南京. [S.l.: s.n.], 2008: 581-585.
- XIONG X Z, HU J H. Development and application of fractional lower order statistics signal in communication anti-jam [C]// China Institute of Communications Fifth Annual Meeting, 2008, Nanjing, China. [S.l.: s.n.], 2008: 581-585.
- [22] 刘洋, 邱天爽, 李景春. 脉冲噪声环境下改进的顽健循环时延估计算法[J]. 通信学报, 2013, 34(6): 184-200.
- LIU Y, QIU T S, LI J C. Modified robust time delay estimation algorithm based on cyclostationarity in impulsive noise [J]. Journal on Communications, 2013, 34(6): 184-200.
- [23] 岳碧波, 彭真明, 张启衡. α 稳定分布地震信号特征指数估计方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 2026-2034.
- YUE B B, PENG Z M, ZHANG Q H. α -stable distribution seismic signal characteristic exponent estimation[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 2026-2034.
- [24] 董妹敏. 水声信号处理的盲信号分离方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012:25-36.
- DONG S M. Study on blind source separation of underwater acoustic signal processing [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012:25-36.
- [25] 陈志毅, 周穗华, 冯士民. 脉冲性大气噪声的高斯化滤波[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(6): 784-789.

CHEN Z Y, ZHOU S H, FENG S M. Removal of impulsive atmosphere noise based on Gaussian filter[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2013, 28(6): 784-789.

[作者简介]



张高境(1989-),男,四川理工学院硕士生,主要研究方向为电力载波通信终端干扰抑制技术等。



熊兴中(1971-),男,博士(后),四川理工学院教授、硕士生导师,四川省学术技术带头人后备人选,IEEE会员,中国通信学会高级会员,中国电子学会高级会员。2013-2014年在香港城市大学做访问学者。四川省杰出青年基金项目获得者,四川省青年科技创新团队项目负责人,四川省高校科研创新团队项目负责人,IEEE Trans Veh Tech、IEEE Trans Commun、电子学报、通信学报、中国通信等期刊的审稿人。主要从事无线与移动通信技术、智能信号处理、物联网技术和VLSI设计等方面的教学及科研工作。近年来主持或主研国家级、省部级各类科研项目10余项,发表学术论文60余篇,其中SCI/EI检索收录40余篇,出版专著1部,获得发明专利3项,申请发明专利5项。