

DOI: 10.7667/PSPC170997

基于适应性扩展和阈值分割的低压电力线信道 数据处理算法的研究与应用

谢文旺¹, 孙云莲¹, 黄雅鑫¹, 王华佑¹, 徐冰涵¹, 张众发², 王庆斌²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 广东电网公司云浮供电局, 广东 云浮 527300)

摘要: 为了克服电力线通信系统中严重的多径衰落效应, 改善低压电力线通信系统的通信质量, 引入基于适应性扩展和阈值分割的数据处理算法。建立了 OFDM 通信系统以及电力线信道的仿真模型, 分别对适应性扩展算法以及三级阈值分割算法在电力线通信领域的应用进行了仿真分析。与传统的 OFDM 通信系统的信道估计技术相比, 该算法不占用宝贵的频带资源并且易于实现。实验证明, 除去信号被噪声淹没等一些极端情况, 对于各种多径信道, 该方法均可以有效对抗多径衰落特性, 降低误码率(BER), 提高通信质量。

关键词: 电力线通信; OFDM; 多径衰落; 适应性扩展; 阈值分割

Research and application of data processing algorithm for low voltage power line channel based on adaptive expansion and threshold segmentation

XIE Wenwang¹, SUN Yunlian¹, HUANG Yaxin¹, WANG Huayou¹, XU Binghan¹, ZHANG Zhongfa², WANG Qingbin²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yunfu Power Supply Company, Guangdong Power Grid Corporation, Yunfu 527300, China)

Abstract: In order to overcome the serious multipath fading effect in power line communication system and improve the communication quality of low-voltage power line communication system, a data processing algorithm based on adaptive expansion and threshold segmentation is introduced. Simulation models of OFDM communication system and power line channel are established, simulations for the application of expansion algorithm and three-level adaptive threshold segmentation algorithm in the area of power line communication are performed respectively. To sum up, this algorithm does not take up precious bandwidth and easy to realize compared with the traditional OFDM channel estimation techniques. Experimental results show that the proposed method can effectively combat multipath fading characteristics, reduce the Bit Error Rate (BER) and improve the communication quality for a variety of multipath channels.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. 035300KK52150007).

Key words: power line communication; OFDM; multipath fading; adaptive extension; threshold segmentation

0 引言

电力线通信(Power Line Communication, PLC)技术是一种把电力线作为通信信道来传输数据以及媒体信号的一种通信手段^[1-2], 其组网简单、经济性好、可靠性高, 应用开发前景十分广阔。但同时, 由于电力线架设的初衷是为了传输电能, 将电力线运用于信号传输, 将不可避免存在一些弊端。其中, 电力线的多径衰落和信道噪声是影响通信质量的主

要因素^[3]。

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术是目前在电力线通信领域运用最为成熟的数据传输技术, 其不仅频谱利用率高, 而且抗码间干扰和多径衰落的能力比较强。但传统的 OFDM 系统均采用的是信道估计方法提高电力线通信的通信质量。信道估计技术发展至今已经衍生出了多种数据处理算法。文献[4]利用了超宽带信道在时域上的稀疏性, 提出了稀疏度自适应正则化压缩采样匹配追踪(SARCoSaMP)算法, 文献[5]是针对传统的基于离散余弦变换(DCT)的正交频分

复用信道估计算法去除噪声不够理想的问题, 提出了一种结合离散小波变换(DWT)与 DCT 差值的 OFDM 信道估计新方法, 文献[6]则是针对基于 Lloyd-Max 的平坦衰落信道估计算法估计精度低且无法适用于高阶 QAM 调制的问题, 提出了基于改进 Lloyd-Max 的信道估计算法。以上算法均是基于信道估计的基本原理衍生出来的数据处理方法, 虽然目前这一类算法的研究成果很多, 但其仍然存在着添加的导频序列会占用宝贵频谱资源的问题, 本质上是一种以降低信号传输效率换取低误码率的方式。因此, 本文基于电力线信道的多径衰落特性, 提出了一种基于适应性扩展和阈值分割的数据处理算法, 利用适应性扩展抵抗数据经过信道时的快速衰落效应, 利用阈值分割抵抗由电力线信道时变性和噪声带来的数据弥散效应, 这种算法不占用系统的频谱资源。为了研究其性能, 本文分别搭建了 OFDM 通信系统模型和电力线信道的仿真模型对算法进行仿真分析。结果表明, 除去信号被噪声淹没等一些极端情况, 对于各种环境下的多径信道, 该方法均可以有效降低误码率, 提高电力线通信的通信质量。

1 OFDM 通信系统建模

OFDM 是一种多载波调制的数字通信技术, 其基本原理就是将一串高速数据流信号经过串并变换转换为多路并行的低速数据, 然后通过大量的子信道并行传输^[7-8]。经过电力线的信号通过 OFDM 系统进行传输, 原信道被分为若干个相互独立的子信道, 信号在每个子信道上仍然是平坦衰落过程, 因此可以很好地克服电力线信道频率选择性衰落特性, 极大程度避免了信号发生不可恢复失真的可能性。传统的 OFDM 系统基本原理如图 1 所示。

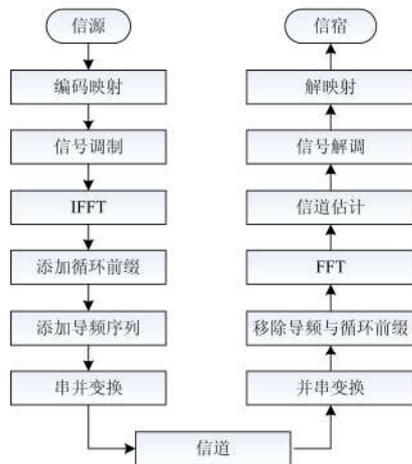


图 1 传统 OFDM 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional OFDM system

本文对 OFDM 系统建模时, 信源部分采用随机数发生器模拟待传输的原始数据符号, 信号调制模块采用目前在 OFDM 系统中应用最普遍的 16QAM 的调制方式, 循环前缀设置为 OFDM 符号长度的 1/4, 设置 OFDM 子载波数为 512, 移除传统 OFDM 系统中的导频和信道估计模块, 后续加入电力线信道模型后, 采用适应性扩展和阈值分割算法代替信道估计模块, 模型建立后, 仿真结果如图 2 和图 3 所示。

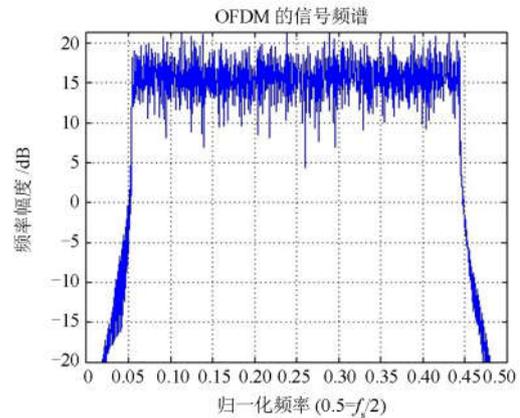


图 2 OFDM 信号频谱图

Fig. 2 OFDM signal spectrum

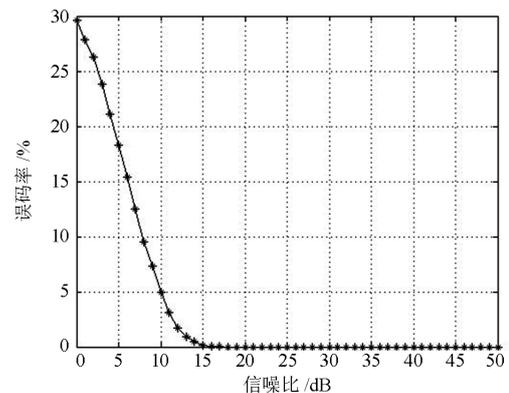


图 3 高斯白噪声信道下 OFDM 系统误码率曲线

Fig. 3 BER curve of OFDM system in Gauss white noise channel

由图 2 可以看出, OFDM 系统本身的频谱利用率很高, 从而使得与其他通信系统相比, 具有较好的传输效率优势。但同时由图 3 可以看出, 即使是在最常见的高斯白噪声信道下, OFDM 系统对噪声依然比较敏感。

2 电力线信道建模

在完成 OFDM 仿真模型的搭建后, 为了构建完整的低压电力线通信系统的模型, 还需要对电力线

信道进行建模。而对于低压电力线信道，对其建模需要建立包括多径、衰减、噪声、时变性在内的完整信道模型，其建模过程简述如下。

2.1 多径衰落模型的建立

电力线的多径模型不仅需要模拟电力线随距离和频率衰落的特性，同时还需要模拟出电力线在信号传输过程中在多条线路上发生反射的多径特性。到目前为止，经过国内外无数学者的研究证明，结合电力线信道的频率选择特性和衰减特性的多路信号的传输函数可以用下式来表示^[9]。

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \exp((- \partial_0 + \partial_1 f^k) d_i) \exp(-j2\pi f d_i \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{C_0})$$

式中： g_i 表示与电力线网络的拓扑结构相关的权衡因子； ∂_0 、 ∂_1 和 k 均为衰耗参数； d_i 表示实际电力线信道的长度； ϵ_r 为实际电力线的媒介系数； C_0 表示光速。

根据上式，基于 Matlab 可以构建出电力线信道的多径衰落模型，本文构建电力线模型所取的参数如表 1 所示^[10]，其幅频响应如图 4 所示。

表 1 四径信道仿真参数

Table 1 Four-channel simulation parameters

i	g_i	d_i / m
1	0.64	200
2	0.38	222.4
3	-0.15	244.8
4	0.05	267.5

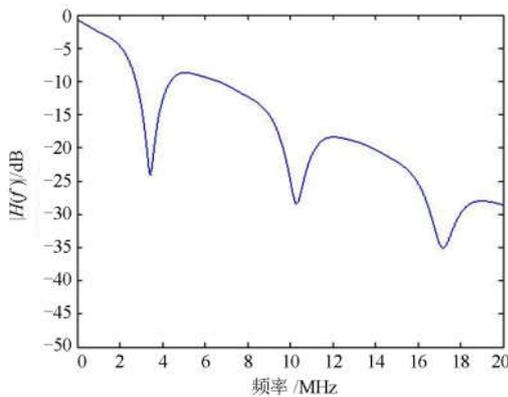


图 4 四径低压电力线信道模型的幅频响应

Fig. 4 Amplitude frequency response of four-channel low voltage power line channel model

图 4 的仿真结果与文献[10]中电力线的实测幅频响应吻合较好。由图 4 可以看出，电力线信道在频域上具有典型的频率选择性衰落特性，并且在整体的衰减特性随频率的增加而更加严重。

2.2 噪声模型的建立

噪声特性也是电力线信道特性中的重要部分，目前对电力线五种噪声模型的搭建如下。

1) 有色背景噪声

有色背景噪声是一种随机干扰，其变化速度相对比较缓慢，并且功率谱密度随频率的增加而逐渐减小^[11-12]。在建模的过程中，有色背景噪声可以用高斯白噪声经过整形滤波后来生成。

2) 窄带噪声

窄带噪声的一般形式是调幅的正弦信号，其主要由频率在 1~22 MHz 之间的中短波广播信号干扰产生^[13-14]。

3) 同步于工频的周期脉冲噪声

同步于工频的周期脉冲噪声的重复率一般为 50 Hz 或 100 Hz，并且一般情况下持续时间比较短，功率谱随着频率的增加有明显的减少^[15-17]。

4) 异步于工频的周期脉冲噪声

异步于工频的周期脉冲噪声的重复率一般在 50~200 kHz 的范围内，其功率是区别于一般噪声的典型离散谱^[18]。

5) 随机脉冲噪声

随机脉冲噪声一般是系统中能量很大的脉冲干扰或者脉冲干扰群，能量集中且持续时间短^[19]。

根据上述原理，构造出的电力线信道噪声波形如图 5 所示。

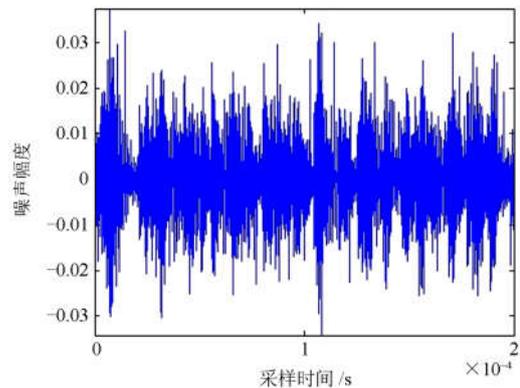


图 5 构造出的电力线信道噪声波形

Fig. 5 Constructed power line channel noise waveform

3 适应性扩展及阈值分割算法

3.1 仿真结果分析

用上述构建出的电力线信道替换原 OFDM 系统模型中的测试信道，即可构建出完整的通信系统模型。在电力线信道下，分别调节信噪比为 30 dB、20 dB、15 dB 和 10 dB 进行仿真测试，接收到信号的星座图如图 6 所示。

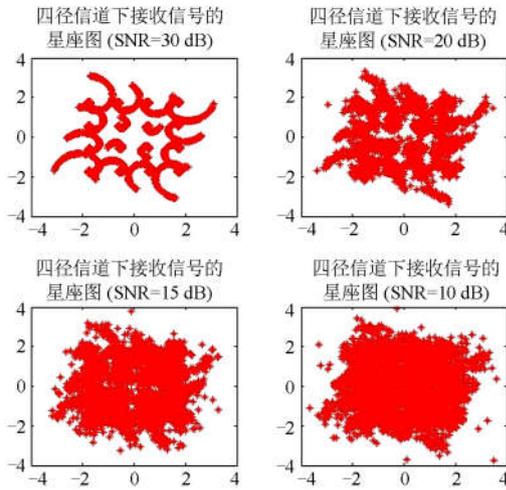


图 6 四径信道下不同信噪比时接收信号的星座图
Fig. 6 Constellation of received signals at different SNR ratios over four-channel channels

由图 6 可以看出, 在高信噪比时, 电力线信道的多径衰落特性为通信质量的主要影响因素, 多径衰落特性会使得数据符号在星座图中发生收缩和拖尾现象, 原本聚集在 4 个区域的数据符号绝大多数会收缩到一个区域中去, 使通信产生误码。当信噪比降低时, 由于噪声的影响会使得数据符号在星座图中产生弥散, 而由于弥散使得部分信号游离出原本的区域也会使通信产生误码。若原始的数据符号随机均匀产生, 理论假设原来 4 个区域全部收缩进入一个区域, 则其数据迁移情况如表 2 所示。

表 2 经过电力线信道后的数据理论迁移表

Table 2 Data theoretic migration table after power line channel

原二进制数据	接收到的数据	误码率
0000	0101	50%
0001	0101	25%
0010	0110	25%
0011	0110	50%
0100	0101	25%
0101	0101	0
0110	0110	0
0111	0110	25%
1000	1001	25%
1001	1001	0
1010	1010	0
1011	1010	25%
1100	1001	50%
1101	1001	25%
1110	1010	25%
1111	1010	50%

由表 2 可以计算理论误码率如式(1)所示。

$$BER = \sum_{i=1}^N (a_i \cdot b_i) \quad (1)$$

式中: a_i 表示每个区域中所包含数据的占比; b_i 表示每个区域数据符号的误码率; N 表示区域总数。由表 2 数据可以计算得到理论误码率 $BER=25\%$ 。图 7 为所构建的仿真模型在电力线不同信噪比下的误码率, 由图 7 可见, 在信噪比较高时, 误码率基本在 25.2%左右, 仿真结果与实际的理论计算结果吻合的较好。

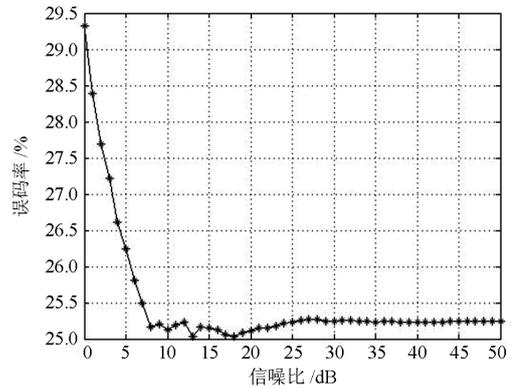


图 7 未进行信道估计时接收数据的误码率
Fig. 7 BER of received data without channel estimation

3.2 适应性扩展及阈值分割算法

由上述仿真结果可见, 在不进行信道估计以及任何的算法处理时, 原始数据符号经过电力线信道的误码率随着信噪比的增加最低也只能降低到 25%左右。传统的 OFDM 系统采用信道估计算法提高通信质量降低误码率, 但这种算法需要在原始数据中添加导频序列, 会占用频谱资源, 降低数据传输效率并且实现复杂。因此, 本文提出了一种用于处理接收信号的适应性扩展及阈值分割算法用于提高系统的通信质量。

1) 适应性扩展算法

由于信号经过电力线信道后会产生衰落, 并且由图 4 可见电力线信道具有频率选择性衰落。但对于 OFDM 系统, 由于其将信号调制到了各个子载波上, 通过仿真测试可知信号在各个子载波上具有平坦衰落特性。因此, 将信号根据其各个子载波上的平坦衰落特性将信号分区域进行适应性扩展。适应性扩展可以看作是阈值分割算法的预处理, 其原理是以接收数据的极值作为典型数据确定出适应性扩展系数, 再根据求出的扩展系数对数据符号进行适应性扩展运算, 其目的是使得衰落后的信号适应性扩大, 大体恢复到原始的区域, 但通过扩展系数

的限制又使得数据符号不会超出星座图范围，从而不会产生新的误码。其具体步骤如下。

首先根据式(2)和式(3)确定适应性扩展系数。

$$R_x = \alpha_1 \frac{R_{\min}}{\delta_1} + \alpha_2 \frac{R_{\max}}{\delta_2} \quad (2)$$

$$I_x = \beta_1 \frac{I_{\min}}{\gamma_1} + \beta_2 \frac{I_{\max}}{\gamma_2} \quad (3)$$

式中： R_x 与 I_x 分别表示数据符号的实部与虚部的适应性扩展系数； α_1 、 α_2 、 β_1 和 β_2 均为加权系数，在本仿真模型中，数据源随机产生大量的信号数据，因此加权系数可以取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 0.5$ ； δ_1 、 δ_2 、 γ_1 和 γ_2 均为 16QAM 调制信号的实部和虚部的极值。

在实部与虚部的适应性扩展系数分别确定以后，在接收器前对数据符号进行适应性扩展操作，其仿真结果如图 8 所示。

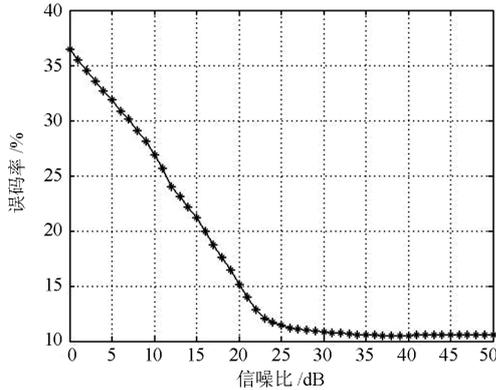


图 8 适应性扩展后接收数据的误码率

Fig. 8 Bit error rate of received data after adaptive expansion

由图 8 可以看出，经过适应性扩展后，接收数据的误码率在大范围内得到了明显降低，尤其对于高信噪比时，适应性扩展算法可以使误码率降低到 11% 左右。因此，适应性扩展可以对电力线的多径衰落特性具有很好的抗性。

2) 阈值分割算法

阈值分割是常常用在图像处理领域的一种算法，其由于实现简单、计算量小、性能稳定而成为图像处理中最广泛应用的分割技术。本文基于其基本原理，在 OFDM 数据处理中引入阈值分割算法，综合提高运算速度与降低误码率的目标，设置了三级阈值对数据进行处理，其具体步骤如下。

(1) 确定阈值划分的等级，本文在 16QAM 调制的基础上设置三级阈值，每级包含四个区域，各个区域的计算中心及对应阈值如式(4)一式(6)所示。

$$a_x = \sum_{i=1}^{N_x} \alpha_i \frac{R_{ix}}{N_x} \quad (4)$$

$$b_x = \sum_{i=1}^{N_x} \beta_i \frac{I_{ix}}{N_x} \quad (5)$$

$$r_x = \lambda \sum_{i=1}^{N_x} \frac{\sqrt{(R_{ix} - a_x)^2 + (I_{ix} - b_x)^2}}{N_x} \quad (6)$$

式中： a_x 和 b_x 分别表示区域 x 的计算中心的实部和虚部； α_i 和 β_i 分别表示实部和虚部的加权系数； R_{ix} 和 I_{ix} 分别表示区域 x 中数据符号的实部和虚部； N_x 表示区域 x 中所有的数据点的个数； r_x 表示区域 x 的阈值； λ 表示扩展系数。

(2) 在确定了区域 x 的计算中心 (a_x, b_x) 以及阈值 r_x 后，对数据符号进行阈值分割处理，对所有数据符号 (R_i, I_i)，若满足式(7)，则将其赋值为区域 x 的理论中心 (A_x, B_x)，若不满足，则维持原数据不变。

$$\sqrt{(R_i - a_x)^2 + (I_i - b_x)^2} \leq r_x \quad (7)$$

根据上述阈值分割原理，在适应性扩展的基础上对阈值分割算法进行仿真测试，仿真的结果如图 9 和图 10 所示。

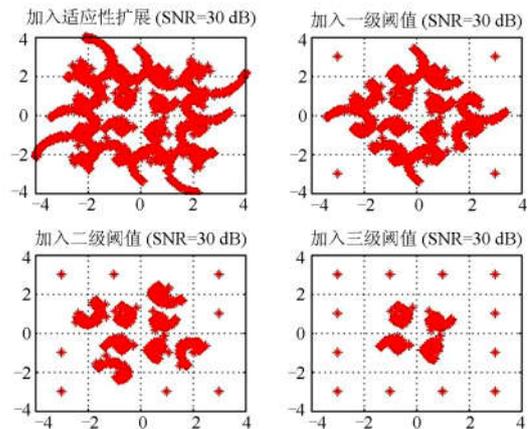


图 9 加入算法后接收数据的星座图

Fig. 9 Constellation of the received data after adding algorithm

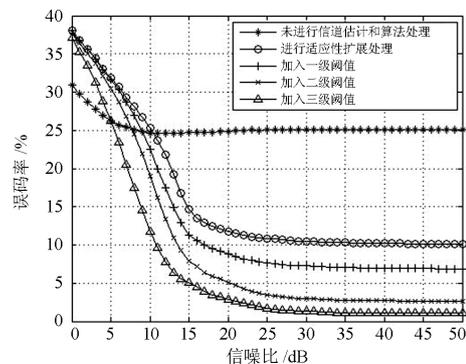


图 10 加入算法后的仿真结果曲线

Fig. 10 Simulation result curve after adding algorithm

从图 9 中可以看出, 经过每一级阈值分割处理以后, 在星座图上就有 4 个区域的数据点被赋值到理论中心, 经过三级阈值分割以后, 剩余的 4 个区域基本在各自区域内部, 因此不需要设置四级阈值。图 10 表示信噪比从 0~50 dB 变换时逐步加入算法后, 接收数据的误码率变化曲线。从图 10 中可以看出, 加入适应性扩展和三级阈值分割算法后, 从信噪比大于 5 dB 开始, 通信系统的误码率都得到了大幅度降低, 尤其在信噪比较高的环境下, 通信系统的误码率可以降低到 1% 以下, 通信质量得到了极大的提升。

4 结论

本文基于 OFDM 系统的通信原理以及电力线信道的基本特性搭建出了电力线通信系统模型, 通过对模型的仿真测试与理论进行对比证明模型的正确性。本文对适应性扩展和阈值分割算法的基本原理进行了详细阐述并对其进行仿真测试, 实验结果表明, 除去数据符号被噪声淹没(信噪比极低)等极端情况以外, 本算法均可以很好地抵抗电力线的多径衰落和噪声特性, 降低误码率, 提高通信系统的通信质量。并且本算法实现方便, 不占用频谱资源, 在提高通信可靠性的基础上兼顾了通信的有效性, 对电力线通信质量的提高方法提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 何玉钧, 刘毅, 周生平. 基于物元可拓模型的电力通信网风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 64-69.
HE Yujun, LIU Yi, ZHOU Shengping. Risk evaluation for electric power communication network based on matter-element extensible model[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 64-69.
- [2] 程晓荣, 张兰, 岳娇. 基于粗糙集属性约简的评估模型在电力通信网风险评估中的应用及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 44-48.
CHENG Xiaorong, ZHANG Lan, YUE Jiao. Application and implementation of the assessment model based on rough set attribute reduction in power communication network risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 44-48.
- [3] LE Jian, WANG Cao, ZHOU Wu, et al. A novel PLC channel modeling method and channel characteristic analysis of a smart distribution grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 146-158. DOI: 10.1186/s41601-017-0044-2.
- [4] 王艳芬, 丛潇雨, 孙彦景. 一种稀疏度自适应超宽带信道估计算法[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(3): 498-504.
WANG Yanfen, CONG Xiaoyu, SUN Yanjing. Sparsity adaptive algorithm for ultra-wideband channel estimation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3): 498-504.
- [5] 谢斌, 陈琴, 杨丽清. 一种结合 DWT 与 DCT 插值的 OFDM 信道估计新方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 313-318.
XIE Bin, CHEN Qin, YANG Liqing. A new method for channel estimation of OFDM based on DWT and DCT interpolation[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38(3): 313-318.
- [6] 谷双春, 张润生. 一种基于改进 Lloyd-Max 的信道估计算法[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(3): 56-59.
GU Shuangchun, ZHANG Runsheng. A new channel estimation method based on improved Lloyd-Max[J]. Radio Communications Technology, 2017, 43(3): 56-59.
- [7] LIU Yue, YANG Chuanchuan, LI Hongbin. Pseudo pilot-aided OFDM system with high spectral efficiency for high performance coaxial transmission[J]. Science China (Information Sciences), 2017, 60(6): 191-199.
- [8] 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 Liang, LIU Xiaosheng, QI Jiabin, 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.
- [9] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the power line channel[J]. IEEE Transactions on Communication, 2002, 50(4): 553-559.
- [10] 宦若虹, 金向东. 基于 OFDM 的电力线通信系统的 Matlab 仿真[J]. 现代电子技术, 2006(1): 129-131, 134.
HUAN Ruohong, JIN Xiangdong. Matlab simulation of an OFDM power line communication system[J]. Modern Electronic Technology, 2006(1): 129-131, 134.
- [11] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 宽带 MIMO-PLC 随机参数信道建模与特性[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 1029-1034.
CAO Wangbin, YIN Chengqun, XIE Zhiyuan, et al. Modeling and analysis of broadband MIMO-PLC random parameter channels[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 1029-1034.
- [12] 索超男, 张慧, 赵雄文. 小波基在低压电力线信道有色背景噪声建模中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 121-125.
SUO Chaonan, ZHANG Hui, ZHAO Xiongwen.

Research on the application of wavelet basis functions in modeling of colored background noise for low-voltage power line channels[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 121-125.

[13] 谷志茹, 刘宏立, 詹杰, 等. 智能电网窄带OFDM通信系统噪声抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 269-276.
GU Zhiru, LIU Hongli, ZHAN Jie, et al. Noise suppression investigation of a narrowband power line communication for smart grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 269-276.

[14] 赵永辉, 张建伟, 李仕林, 等. 基于低压电力线载波通信信道特性的分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(10): 216-218.
ZHAO Yonghui, ZHANG Jianwei, LI Shilin, et al. Analysis of channel characteristics based on low voltage power line carrier communication[J]. Automation and Instrumentation, 2016(10): 216-218.

[15] 刘庆时, 赵贺, 庄斌, 等. 多种通信方式的智能小区信息交互方案设计[J]. 陕西电力, 2016, 44(11): 4-8.
LIU Qingshi, ZHAO He, ZHUANG Bin, et al. Information interaction design for intelligent residential district with multi-communication methods[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(11): 4-8.

[16] 郭以贺, 杜思思. 一种中压电力线通信阻抗匹配电路设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 102-107.
GUO Yihe, DU Sisi. Design of impedance matching circuit for MV power line communication[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 102-107.

[17] TLILI F, ROUISSI F, GHAZEL A. Precoded OFDM for power line broadband communication[J]. IEEE Communications Magazine, 2003(3): 25-28.

[18] 杨名, 陈红卫. 一种基于小波包和 apFFT 的间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 112-117.
YANG Ming, CHEN Hongwei. A method to detect inter-harmonics based on wavelet packet and apFFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 112-117.

[19] 田青, 郝雪, 耿立卓, 等. 电力通信传输网综合培训仿真系统的设计与实现[J]. 陕西电力, 2016, 44(5): 69-73.
TIAN Qing, HAO Xue, GENG Lizhuo, et al. Design and implementation of transmission network integration training simulation system for electric power communication[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(5): 69-73.

收稿日期: 2017-07-05; 修回日期: 2017-09-13

作者简介:

谢文旺(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力信息技术、电力线通信技术; E-mail: xiewenwang_sz@163.com

孙云莲(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力信息技术、智能电网。E-mail: ylsun@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)