DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180823

基于自适应遗传算法的 PLC 信道动态子载波分配

杨 蓉，曹旺斌，尹成群

（华北电力大学电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘要：为提高宽带电力线通信(PLC)的传输速率，在 2~100 MHz 的低压宽带电力线信道条件下，提出基于速率最大化(RA)准则的动态子载波分配算法。该算法利用遗传算法比较好的全局搜索能力，将遗传算法与注水算法结合，对正交频分复用系统(OFDM)动态子载波进行自适应分配。新算法先将种群中的个体进行交叉操作，得到两个新的子代群体，对得到的子代种群进行复制和变异操作。仿真结果表明：改进之后的遗传算法与自适应遗传算法相比较，在性能上有较大改善，系统传输速率变快，信道容量变大。

关键词：电力线信道；信道模型；速率最大化(RA)；遗传算法；子载波分配；信道容量

Dynamic subcarrier allocation of PLC channel based on adaptive genetic algorithm

YANG Rong, CAO Wangbin, YIN Chengqun

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve the transmission rate of broadband Power Line Communication (PLC), a dynamic subcarrier allocation algorithm based on rate maximization (RA) principle is proposed under the condition of low-voltage broadband power line channel in 2~100 MHz. The algorithm exploits the better global search–capability of genetic algorithm and combines the genetic algorithm and water injection algorithm to adaptively allocate subcarriers of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) system. In the new algorithm, it first cross-operates the individuals in the population to obtain two new progeny populations, and reproduces and mutates the obtained progeny populations. Compared with the adaptive genetic algorithm, simulation results show that the whole PLC system performance is improved, the system transmission rate is faster, and the channel capacity becomes larger.

This work is supported by Science and Technology Project of Hebei Province (No. 17211704D) and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018MS096).

Key words: PLC channel; channel model; maximize rate; genetic algorithm; subcarrier allocation; channel capacity

0 引言

电力线载波通信(Power-line Carriers, PLC)使用现有的分布式网络来实现网络的访问和通信，宽带电力线(Broadband Power-line, BPL)指物理层的传输速率达到百 Mbit/s[1]，本文研究了在 2~100 MHz 范围内的低压宽带电力线通信中的动态子载波分配问题。BPL 技术采用正交频分复用调制(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)，首先将高频信号加载到电力线上，在接收端，将信号解调，实现信息的传递[2]。由于不同的子信道受到衰落时，不同的子载波有不同的传输特性，根据不同子载波的瞬时特性分配系统资源(功率、比特数等)，进一步优化系统的性能。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种基于生物适者生存、优胜劣汰的智能优化算法[3]。通过模仿生物进化的过程，根据目标函数确定一个进化方向，进行启发式搜索，具有计算简单、实现难度小、功能强大等优点，适用于解决大规模复杂问题[4]。

遗传算法在许多工程实际领域得以应用，但是研究发现仍存在因适应度函数所造成的结果偏差大、迭代过程过早收敛、复杂度较大等不足。为了解决这些缺陷，许多学者提出了改进的遗传算法。

基金项目：河北省科技计划项目资助(17211704D)；中央高校基本科研业务费专项资金面上项目资助(2018MS096)

文献[5]在无线传输领域，将遗传算法采用整数编码和循环移位交叉的技术来提高搜索能力，较传统的遗传算法收敛速度大大加快。文献[6]随着群体适应度的改变，遗传算法的交叉概率、变异概率也发生同样的改变，对初始种群加入优秀基因个体来提高收敛速度，从而搜索到优秀的子载波。文献[7]引入了自适应遗传算法来分配跨层资源，不易陷入局部最优来最大限度的实现跨层资源分配。文献[8]分析了在速率最大化和裕量最大化准则下，提出了一种基于遗传算法的资源分配，并与贪婪算法与注水算法进行对比分析。本文将注水算法与自适应遗传算法进行结合对宽带电力线子载波进行动态分配。适应度函数由注水算法所得，自适应遗传算法基于速率最大化准则对子载波进行功率分配并迭代寻优。

1　自适应 OFDM 及遗传算法模型

OFDM 技术可以有效抵抗频率选择性衰落和多径时延[9]，宽带电力线通信应用 OFDM 技术。由于不同子信道受到不同程度的衰落，不同子载波的瞬时特性也不同，首先根据信道估计得到不同子载波的信道状态信息，本文为了研究方便，根据电力线信道模型已知信道信息(CSI)，自适应资源分配根据不同子载波的瞬时特性，分配不同的功率及比特[10]。自适应 OFDM 实现过程如下所述。

IFFT 对输入数字序列进行调制，调制分为复基带信号调制和基带信号调制。

$$x(t)=\mathrm{Re}[\sum_{n=0}^{N-1}d_n\mathrm{e}^{\mathrm{j}w_nt}\mathrm{e}^{\mathrm{j}w_ct}] \tag{1}$$

$$x'(t)=\sum_{n=0}^{N-1}d_n\mathrm{e}^{\mathrm{j}w_nt} \tag{2}$$

式中：$w_n=nw_0$，$w_0=\dfrac{2\pi}{T}$，T 为码元周期；w_c 为载波频率。式(2)为等效基带信号。

解调对接收到的子载波信号进行 FFT 变换，分别乘以 $\cos(w_nt)$、$\sin(w_nt)$，在码元周期内积分即可恢复出原序列：

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1}d_n\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}k_n}=\mathrm{IFFT}(d_n) \tag{3}$$

$$d_n=\mathrm{FFT}[X(k)] \tag{4}$$

基于自适应遗传算法的正交频分复用系统基本原理如下：首先根据信道估计得到不同子载波的信道状态信息，然后调用遗传算法对子载波进行最优分配。将自适应 OFDM 与遗传算法结合的模型如图 1 所示。

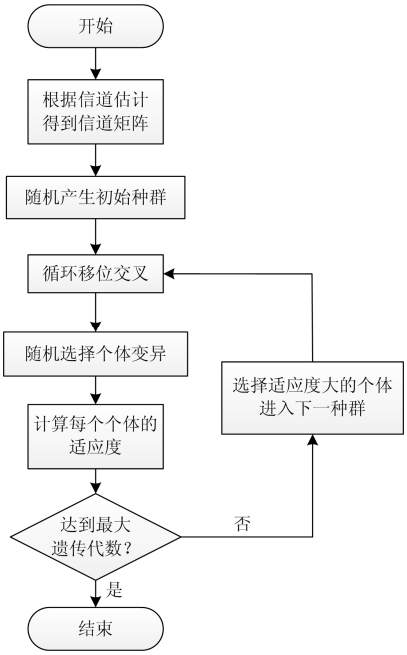


图 1　自适应遗传算法模型

Fig. 1 Adaptive genetic algorithm model

2　电力线信道模型

电力线信道建模分为自下而上建模和自上而下建模。自下而上：在横向电磁场(TEM)或准 TEM 模式下，传输线理论被用来计算传输网络两个端口之间的信道传递函数[11]。自上而下：通过拟合根据测量数据确定的多径模型参数来模拟载波信道的频率响应[12]。本文采用基于自下而上的宽带[13]电力线随机参数信道模型[14]。模型数学表达式和所生成的信道传输特性分别如式(5)和图 2 所示。

$$H(f)=\sum_{n=1}^{N}g_n\cdot\mathrm{e}^{-(\alpha l_n)}\cdot\mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{j}2\pi l_n}{v}}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\varphi_n} \tag{5}$$

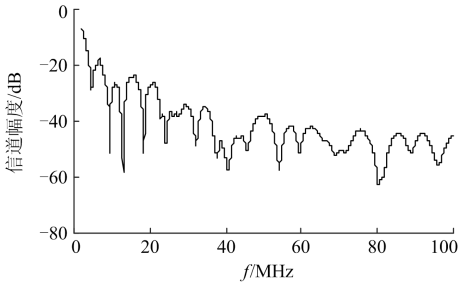


图 2　电力线信道模型

Fig. 2 Powerline channel model

3　自适应遗传算法的资源分配

3.1　自适应遗传算法

基本自适应遗传算法是基于发射功率最小化

(MA)准则的子载波分配算法，将电力线通信中的 OFDM 子载波分配转换为一种新颖的遗传算法求解模型[15]，通过多次迭代遗传操作，搜索到一个较优的子载波分配方案，算法流程如下所述。

(a) 初始化：设定最大迭代次数 MaxGeneration 为算法的终止条件，设定初始群体规模，初始群体由随机产生。

(b) 编码：将需要解决问题的可能解表示成染色体，通过二进制编码，将用户序号由十进制转化为二进制[16]。遗传算法编码方式见表 1。

表 1 遗传算法编码方式图

Table 1 Genetic algorithm coding scheme

基因 1	基因 2	…	基因 N_t–1	基因 N_t
用户序号	用户序号	…	用户序号	用户序号

(c) 种群选择：以轮盘赌的形式，在父辈选出优秀的父辈进入下一代，具有较强适应能力的个体进化到下一代，适应度小的个体也可能进化到下一代。由式(6)表示。

$$P_i = f(x_i) / \sum_{n=1}^{N} f(x_i) \tag{6}$$

(d) 交叉操作：随机选出相邻两个染色体进行交叉配对，结合电力线载波通信，即选择相邻两个子载波进行交叉配对。随机选择一个交叉点，并根据交叉概率对选择的染色体进行交叉操作。

(e) 变异操作：根据变异概率，对选择用于突变的染色体进行基因变异操作。由选择、交叉、变异后得到一个新的种群。

(f) 根据最大迭代次数，重复步骤(c)—(e)，进行循环操作，直到满足终止条件并输出最优适应度函数值。

3.2 改进的自适应遗传算法

基于遗传算法的 OFDM 自适应资源分配是对基本自适应遗传算法的改进，通过对适应度函数和遗传算法的改进，改进之后的自适应遗传算法能够更优的对 OFDM 的子载波进行分配，通过迭代寻优，找到最好的子载波分配。改进之后的自适应遗传算法框如图 3 所示。

算法实现步骤如下所述。

(a) 初始化：首先根据所选择的宽带电力线信道模型，根据信道估计得到不同子载波的信道状态信息(CSI)，设定最大迭代次数为 MaxGeneration，种群规模即 OFDM 子载波的个数为 N，变异概率 $P_m(0<P_m<1)$，总带宽为 W，总功率为 P_t，用遗传算法设定初始变量：每一代最优个体的分量、每一代最优个体的评价函数、全部个体的分量、全部个体的评价函数。

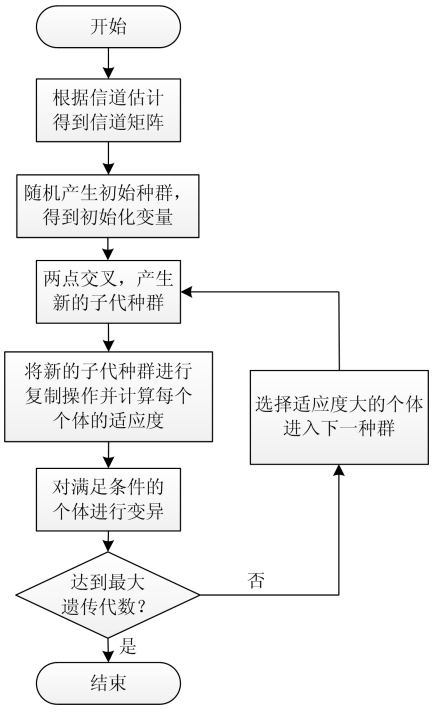
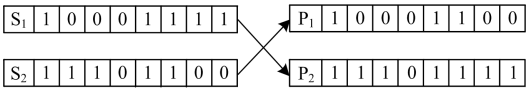


图 3 改进的自适应遗传算法

Fig. 3 Improved adaptive genetic algorithm

(b) 初始种群产生：根据电力线信道模型，首先信道估计得到每个子载波的信道状态信息，分别产生两个数组，一个为离散均匀分布的随机数组 X_1，一个长度为 n 的随机 DNA 序列 X_2。之后进行迭代寻优。

(c) 交叉过程：初始化新种群，首先选择一个数组 X_1，随机选出两个染色体 S_1 和 S_2，将两者的部分基因码值进行交叉，选择单点交叉，以下面两个 8 位染色体为例。



假设该随机数为 4，将 S_1 和 S_2 的低四位进行交叉，交叉之后的结果为 P_1、P_2。

通过交叉操作产生两个子代 a、b，将新产生的两个子代加入到新种群中，由于不同子载波携带的基因信息不同，对不同子载波进行交叉操作，将交叉操作产生的子代形成一个新的种群，然后对另一个数组 X_2 进行相同的操作，产生两个新的种群。

(d) 复制过程：取两个种群的任意一列进行复制操作，计算群体中每个染色体的适应度函数值，采用排名选择法，根据适应度函数大小按顺序排列，按照一定比例将适应度较大的染色体替换适应度较小的染色体。将选取的子代进行排序，若子代 1 最

小，则适应度函数用子代 1 的表示，依次类推，可得每个子载波的适应度。

(e) 计算适应度函数：适应度函数由注水算法的功率分配[17]所得，利用已有选择的电力线信道模型，初始化子载波分配的功率，根据注水算法在总功率不变时，动态的给子载波分配功率，根据下列公式进行分配：

$$P=\frac{(p(k)+\sum_{n=0}^{N-1}(\frac{1}{CNR}))}{N}-\frac{1}{CNR} \tag{7}$$

适应度函数为

$$FITNESS=\min\sum_{n=0}^{N-1}P(i) \tag{8}$$

由注水算法所得的功率分配点数与所需要的实际数据不同，要得到所要求的适应度函数，将点数进行扩展，得到所需维度的函数，但又不会对原数据造成影响。

由式(8)所得的适应度函数，可计算得到每次迭代最优个体的评价函数值：

$$best=\max(FITNESS) \tag{9}$$

(f) 变异操作：设定变异概率 P_{m}，经过复制操作后的基因种群在满足小于变异概率的条件下，对两个新的种群进行变异处理，即为使一个新的用户占用子载波。

(g) 迭代寻优：终止条件为最大迭代次数，记录最佳个体和收敛曲线，通过图像记录子载波功率分配以及收敛情况，算法终止。计算电力线载波通信的信道容量。

$$C=\sum_{n=1}^{N}\Delta f\log_2(1+\frac{P_{\mathrm{T}}(f_n)|h(f_n)|^2}{N_{\mathrm{R}}(f_n)}) \tag{10}$$

式中：Δf 为频率间隔；$P_{\mathrm{T}}(f_n)$ 为子信道的分配功率；$h(f_n)$ 为频率响应；$N_{\mathrm{R}}(f_n)$ 为噪声功率。

4　仿真结果与性能分析

文献[18-20]对于电力线信道模型做了详细地分析介绍，通过实际测量数据和理论模型相结合，本文主要是在 2~100 MHz 的范围内，对宽带电力线的子载波动态分配进行研究，子载波个数即种群规模为 64，带宽为 5 MHz，子载波间隔 $\Delta f=0.0749\times10^6$ MHz，设定发射功率 $P_{\mathrm{t}}=-55$ dBm/Hz，噪声功率谱密度 $P_{\mathrm{n}}=10^{-5}$ W/Hz[21]。变异概率 $P_{\mathrm{m}}=0.1$，发射总功率 $P_{\mathrm{t}}=5$ MW，下面为仿真结果图。

图 4 是本文算法子载波最后的功率分配，设定最大迭代次数为 100，每一次迭代过程寻找功率分配最优的子载波，结果可看出改进后的算法功率分配较公平。图 5 为每一代最优个体的评价函数值，即每次迭代子载波分配功率的最优值，通过迭代寻优，找到分配的功率最大值与最小值，评价函数的最大值稳定值为 0.022。图 6 是信道容量随遗传代数变化的曲线图，随着遗传代数的增大，系统信道容量不断增大，最后趋于一个稳定值，由图中可以得到最大信道容量为 26 Mbit/s。

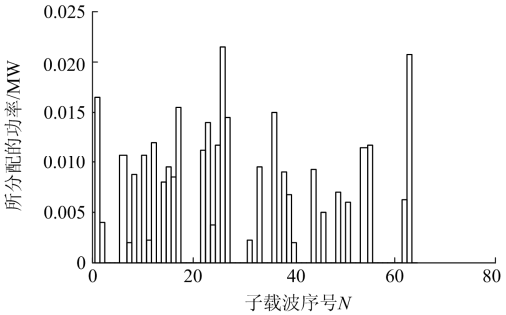


图 4 改进的自适应遗传算法功率分配

Fig. 4 Improved adaptive genetic algorithm power allocation

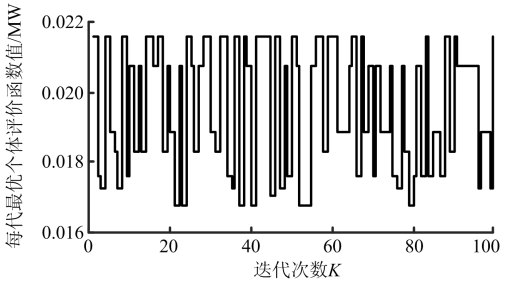


图 5 每一代最优个体的评价函数值

Fig. 5 Value of the evaluation function for each generation of optimal individuals

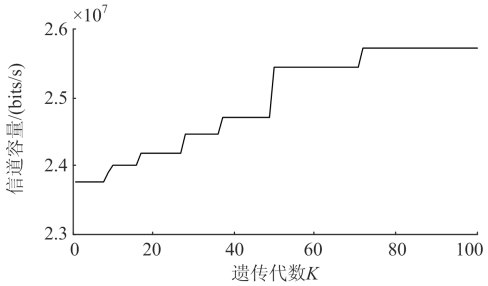


图 6 信道容量的变化图

Fig. 6 Change in channel capacity

设定相同的参数条件，将改进后的自适应遗传算法与文献[5]已有的算法在某些性能上进行比较。设定初始参数，系统总功率为 1 W，总的可用带宽为 1 MHz，总的子载波个数为 64，变异概率为 0.1，

不同的是：文献[5]中的算法是在无线环境下进行的仿真，本文主要是研究在电力线信道条件下的仿真，在使用参数一致的条件下对子载波进行分配。

图 7 是在迭代次数为 200 时，每一代的适应度函数值，当总功率变大时，系统的适应度评价函数也相应变大，评价函数的最大稳定值增大为 1.41。图 8 是在假设条件下的系统容量，文献[5]中的自适应遗传算法在无线条件下达到的最大信道容量为 4.16 Mbps，本文在电力线信道条件下进行仿真，最大信道容量达到 9.76 Mbps，速率有所提高。

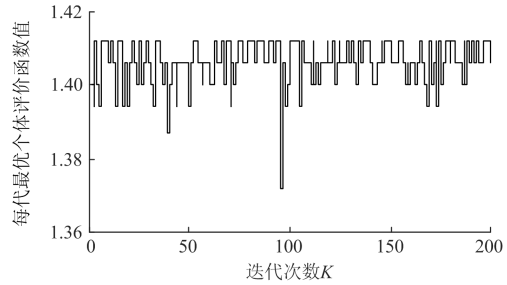


图 7 对比条件下的评价函数值

Fig. 7 Evaluation function value under contrast conditions

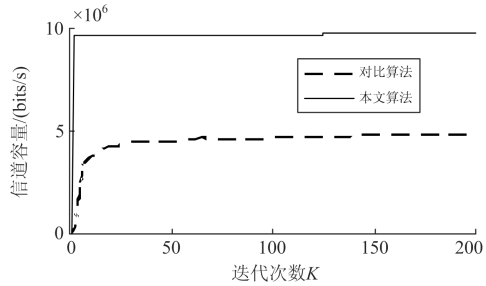


图 8 对比条件下的信道容量

Fig. 8 Channel capacity under contrast conditions

5 结论

在电力线信道模型下，将已有的自适应遗传算法进行改进，改进后的算法把注水算法与改进后的自适应算法结合，通过注水算法初始化功率分配，适应度函数由功率分配所得，将子载波分配功率的适应度值进行遗传操作，迭代寻优，寻求每一代个体中适应度最好的子载波和全部个体中最优的子载波。通过分析结果可得，改进后的算法信道容量达到近 26 Mbits/s，较基本自适应遗传算法有了很大提高，功率分配更均衡。

参考文献

[1] 陈晗光. 基于遗传算法的宽带电力线通信系统资源分配研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
CHEN Hanguang. Research on resource allocation of broadband power line communication system based on genetic algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[2] 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 Gujing, QIN Liang, YIN Xiaogong, et al. Channel estimation and iterative equalization strategy for an orthogonal frequency division multiplexing low-voltage power line communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 91-96.

[3] LANG H S, LIN S C, FANG W H. Subcarrier pairing and power allocation with interference management in cognitive relay networks based on genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7051-7063.

[4] 王高红, 陈潇一. 基于遗传算法的智能电网非侵入式电器监控策略[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 42-46, 71.
WANG Gaohong, CHEN Xiaoyi. Non-intrusive electrical monitoring strategy for smart grid based on genetic algorithm[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 42-46, 71.

[5] 杜学松, 罗汉文, 余锋. 基于遗传算法的正交频分复用统子载波分配方法: 中国, 101146079[P]. 2008-03-19.
DU Xuesong, LUO Hanwen, SHE Feng. Subcarrier allocation method for orthogonal frequency division multiplexing system based on genetic algorithm: China, 101146079[P]. 2008-03-19.

[6] 王宇飞. MIMO-OFDM 系统天线和子载波联合分配问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
WANG Yufei. Research on joint allocation of antennas and subcarriers in MIMO-OFDM systems[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[7] 汪照, 李有明, 赵翠茹. 基于自适应遗传算法的 OFDMA 资源分配[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013, 26(1): 23-27.
WANG Zhao, LI Youming, ZHAO Cuiru. OFDMA resource allocation based on adaptive genetic algorithm[J]. Journal of Ningbo University (Science and Engineering), 2013, 26(1): 23-27.

[8] 毕晓君, 曹巍巍. 基于自适应遗传算法的 OFDMA 系统跨层资源分配问题研究[J]. 自动化技术与应用, 2010, 29(8): 66-69, 73.
BI Xiaojun, CAO Weiwei. Research on cross-layer resource allocation of OFDMA system based on adaptive genetic algorithm[J]. Automation Technology and Applications, 2010, 29(8): 66-69, 73.

[9] 谢文旺, 孙云莲, 黄雅鑫, 等. 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[J].

电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 100-106.
XIE Wenwang, SUN Yunlian, HUANG Yaxin, et al. Research and application of low voltage power line channel data processing algorithm based on adaptive expansion and threshold segmentation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 100-106.

[10] 程闽明, 陈忠辉. 基于 OFDM 自适应调制的低压电力线通信系统的实现[J]. 有线电视技术, 2015(11): 50-52.
CHENG Minming, CHEN Zhonghui. Implementation of low-voltage power line communication system based on OFDM adaptive modulation[J]. Cable Television Technology, 2015(11): 50-52.

[11] PAPALEONIDOPOULOS I C, KARAGIANNOPOULOS C G, ANAGNOSTOPOULOS I E, et al. An HF multipath-propagation analysing method for power delay profile estimations of indoor single-phase low voltage PLC channels[C] // Proceedings 7th International Symposium Power-Line Communications and Its Applications (ISPLC2003), 2003, Kyoto, Japan: 154-159.

[12] 曹旺斌, 尹成群, 谢志远, 等. 多输入多输出宽带电力线载波通信信道模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1136-1142.
CAO Wangbin, YIN Chengqun, XIE Zhiyuan, et al. Study on multi-input and multi-output broadband power line carrier communication channel model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1136-1142.

[13] 王燕, 杜海明, 赵红梅, 等. 一种新型的超宽带同步捕获方案设计[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(2): 293-298.
WANG Yan, DU Haiming, ZHAO Hongmei, et al. A novel ultra-wideband synchronous acquisition scheme design[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2017, 30(2): 293-298.

[14] LE J, WANG C, ZHOU W, 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.

[15] 岳嵌. 粗粒度并行遗传算法的计算性能及其应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
YUE Qian. The computational performance and application of coarse-grained parallel genetic algorithm[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[16] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

[17] NGO D T, TELLAMBURA C, NGUYEN H H. Efficient resource allocation for OFDMA multicast systems with spectrum-sharing control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4878-4889.

[18] 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 characteristics of random parameter channels for wideband MIMO-PLC[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 1029-1034.

[19] 薛晨, 王艳, 焦彦军. 中压配电网电力线载波通信系统自适应频点选择算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 24-29.
XUE Chen, WANG Yan, JIAO Yanjun. Adaptive frequency selection algorithm for power line carrier communication system of medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 24-29.

[20] 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 a medium voltage power line communication impedance matching circuit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 102-107.

[21] 王业胜, 季薇, 侯晓赟. 认知 OFDM 系统中一种改进的注水功率分配算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 79-82.
WANG Yesheng, JI Wei, HOU Xiaoyun. An improved water-injection power allocation algorithm in cognitive OFDM systems[J]. Journal of Computer Technology and Development, 2013, 23(1): 79-82.

收稿日期：2018-07-06；　　修回日期：2018-08-22

作者简介：

杨　蓉(1993—)，女，硕士研究生，主要研究方向为电力线通信、通信与信息系统；E-mail: yangrong03257@foxmail.com

曹旺斌(1989—)，男，通信作者，博士，讲师，主要研究方向为电力系统通信、智能配用电；E-mail: wbin.cao@foxmail.com

尹成群(1953—)，男，教授，博导，主要研究方向为电气信息分析与处理技术、现代传感与测量技术。E-mail: ycq@ncepu.edu.cn

(编辑　姜新丽)