

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201539

# 低压电力线通信带宽自适应分配策略研究

魏绍亮, 张帅, 程奉玉, 王浩奇, 杨元佳

(河南理工大学机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 目前人们对信息传输的需求越来越高, 低压电力线载波通信已经成为解决“最后一公里”问题的优选方案, 但这种通信方式带宽资源有限且没有建立高效的带宽分配策略。针对低压电力线带宽高效分配问题, 提出了一种基于最优平稳模型的带宽自适应分配策略(Dynamic Bandwidth Allocation for Power Line Communication, DBA-PLC)。DBA-PLC以通信质量评估值为决策变量, 采用最优平稳模型并行训练方法自适应地分配带宽, 并利用数据筛选的方式进行算法简化。经过仿真实验, 验证了该策略的可行性。得出数据筛选率在20%~30%范围内时, 能够在占用资源较少的情况下, 得到理想的带宽分配结果。并证明了带宽分配结果在信道变化率低于0.25时具有持续有效性, 即在一定时间周期内更新一次带宽分配策略, 就能保证通信的高带宽利用率。

**关键词:** 带宽分配; 自适应; 最优平稳模型; 动态规划模型; 数据筛选率

## Adaptive bandwidth allocation strategy for low-voltage power line communication

WEI Shaoliang, ZHANG Shuai, CHENG Fengyu, WANG Haoqi, YANG Yuanjia

(College of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** The demand for information transmission is ever increasing. Low-voltage power line communication has become one of the preferred solutions to solve the "last kilometer" problem. However, this communication mode is limited by the lack of bandwidth resources and there is no efficient bandwidth allocation strategy. In order to solve this problem, a dynamic bandwidth allocation for Power Line Communication (DBA-PLC) based on an optimal stationary model is proposed. DBA-PLC takes communication quality evaluation as the decision variable, adopts a parallel training method of an optimal stationary model to allocate bandwidth adaptively, and optimizes the algorithm by data filtering. Through simulation experiments, the feasibility of the strategy is verified. It is concluded that when the data filtering rate is 20%~30%, an ideal bandwidth allocation result can be obtained under with less resource occupation. It is proved that the bandwidth allocation result has continuous effectiveness when the channel change rate is less than 0.25, that is, updating the bandwidth allocation strategy once in a certain period of time can ensure the high bandwidth utilization of communication.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province "Study on Wavelet Basis-based OFDM Grouping Strategy in the Low-voltage Power Line High-speed Digital Signal Transmission" (No. ZR2010FM041).

**Key words:** bandwidth allocation; adaptive; optimal stationary model; dynamic programming model; data filtering rate

## 0 引言

随着5G时代的来临, 低压电力线通信也被寄予了很多新的期望<sup>[1]</sup>。通过利用先进的通信、信息和控制等技术, 让构建以信息化、自动化、互动化

为特征的智能电网成为了可能<sup>[2-3]</sup>。由于低压电力线通信信道带宽资源有限, 而且窄带干扰又占用了一部分带宽, 所以很难满足多用户、高数据量、同时段、低延迟的通信需求<sup>[4-5]</sup>。为了解决这一问题, 需要寻求一种能根据低压电力线通信工作环境变化而自适应分配带宽的策略, 最大化带宽利用率, 以满足用户的通信需求。文献[6]提出一种基于带权重的轮询算法, 这种算法通过评价虚拟机的相对优先级, 统计接收带宽并以统计结果作为权重划分的依据;

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目资助“低压电力线上高速数字信号传输中基于小波基的OFDM群分策略研究”(ZR2010FM041)

文献[7]提出一种基于低压电力线信道线性周期时变特性并适用于宽带电力线的比特与功率分配的算法,这种算法结合了预分配和二分查找的思想,能够克服信道时变特性带来的不利影响;文献[8]提出一种将带宽分配问题转化为非凸优化问题的带宽分配算法,并用循环最小化方法求解带宽约束的最优解;文献[9]提出了一种面向大数据应用的自适应带宽分配策略,该策略通过构建优化目标函数,并利用启发式算法求解目标函数进而达到优化带宽分配的目的;文献[10]以不同用户带宽需求作为约束条件建立 AP 关联策略模型,提出了一种面向用户需求的带宽分配算法,并将最大带宽分配问题转化为最大子集和问题,通过求解最大子集和问题得到最大带宽分配的用户关联方案;文献[11]根据误差反向传播算法和动态波长预测方法,提出了一种基于误差反向传播算法和神经网络预测的自适应动态波长带宽分配算法。

通过研究低压电力线的自身特性和通信的性能特点,建立了以低压电力线通信质量评估值为决策变量的动态规划模型,提出了一种基于动态规划模型的低压电力线通信带宽自适应分配策略。

### 1 低压电力线通信的带宽分配策略

带宽分配的满足网络中所有用户的通信需求,同时优化系统性能<sup>[12]</sup>。为了达到上述两个目的,按照动态规划的思想制定带宽分配策略。

如图 1 所示,最优平稳带宽分配策略的第一步是根据质量评估值分配最优带宽,以保证所有用户的带宽需求。具体策略是:先将用户带宽分配问题这个多阶段决策问题划分为多个相互联系的阶段,选取低压电力线通信质量评估值作为决策变量,并将用户通信质量评估平均值和最低值定义为约束条件,从而把带宽自适应分配策略的决策问题化成  $N$  个用户分配带宽的子问题。然后,对子问题逐个求解,求解时从边界条件开始,逆方向逐段递推寻优。同时,在求解每个子问题时,都选用已求出子问题的最优结果,最后一个子问题的最优解就是最优平稳带宽分配策略。

最优平稳带宽分配策略的第二步是能够根据低压电力线信道变化自适应地分配带宽。具体策略是:建立随机动态模型以研究信道变化率对带宽分配结果的影响规律,即最优带宽分配结果在信道变化率大于某阈值时会发生变化。每隔一段时间间隔对信道进行检测,确定信道变化率的大小,在信道变化足够大能使最优带宽分配结果发生变化时,重新进行带宽分配,以这种方式减少带宽重新分配的

次数,同时减少对系统资源的占用。

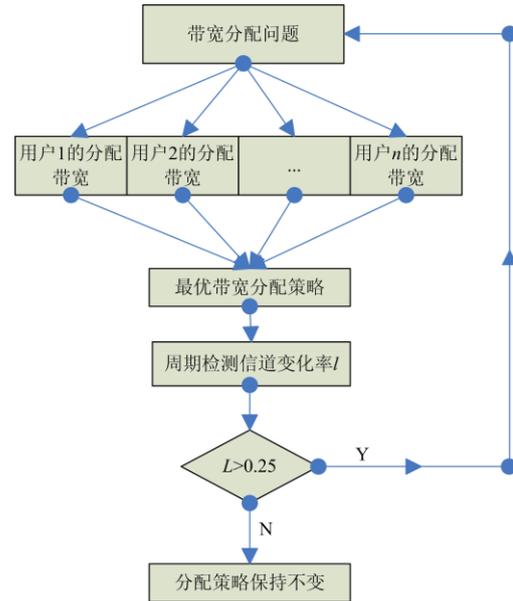


图 1 最优平稳带宽分配策略

Fig. 1 Optimal stationary bandwidth allocation strategy

## 2 最优平稳带宽分配策略的实现

### 2.1 带宽分配方式

在具有  $N$  个用户的低压电力线通信网络中,带宽分配的主要任务是:将可用的总带宽分配给  $N$  个用户,根据  $N$  个用户的带宽需求分配不同长度的带宽,在保证所有用户的通信质量基础上,达到最优的通信质量。为了简化这一过程,可以将分配过程简化:将具有不同带宽需求的  $N$  个用户进行排列组合,然后按照排列结果分配对应长度的带宽,在确保每个用户的通信质量都能满足需求的同时,追求最优的带宽分配结果。根据这一思想,  $N$  个用户对应  $N$  个频段,所有的分配结果可以表示在二维矩阵中:

$$A = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1N} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} & \cdots & q_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $q_{ij}$  表示第  $i$  个用户被分到第  $j$  个频段的质量评估结果。则带宽的最优分配问题可以描述为:在质量评估二维矩阵中,每行取一个元素且每个元素在不同列,求这些元素相加的最大值,如式(2)。

$$Q = \max \sum_{i=1}^N q_{ij} \quad (2)$$

式中:  $Q$  表示分配结果的质量评估平均值;  $j$  表示一个数值为  $1 \sim N$  的随机数(不重复),具有  $N!$  种排

列方式。

在评估结果确定后, 为了保证满足每个用户的通信需求, 则应该保证  $N$  个用户中最差的通信质量评估值也能满足用户需求。在  $N$  个用户分配带宽结果中, 最差的通信质量评估值可表示为

$$Q_{\min} = \min(q_m) \quad (3)$$

式中,  $q_m$  表示评估结果中第  $m$  个用户分配带宽的质量评估值, 其中,  $m \in N^+$  且  $m \leq N$ 。

为了降低算法计算的复杂度, 最有效的办法就是减少数据量<sup>[13]</sup>。提出了一种算法优化思想: 按比例将数值小的数据筛除, 筛除比例可以直接影响算法的计算复杂度, 筛除比例越高, 算法计算量越少, 能够提高带宽分配效率。为了能得到较为合理的带宽分配结果, 数据筛除应在不影响寻优过程的情况下进行, 同时兼顾有效降低算法的计算复杂度。

## 2.2 带宽自适应分配策略的实现

### (1) 随机动态规划模型的建立

随机动态规划模型的框架对于求解最优带宽自适应分配策略问题有很大优势, 针对带宽分配的具体问题, 可以利用无视野无约束的随机动态规划模型进行求解<sup>[14-16]</sup>。首先对用户和用户的分配带宽进行排序, 将“第  $i$  个用户分得的带宽序号为  $j$ ”看作一个平稳随机过程, 令  $X^{(n)}$  是该用户第  $n$  次分得的带宽序号, 则这个随机过程的状态空间为  $M = \{1, 2, \dots, N\}$ , 由于低压电力线通信信道是一个慢时变信道, 未来状态的  $X^{(n+1)}$  独立于过去的状态, 且仅依赖于当前的状态和一些以前的状态, 所以带宽分配过程可以看作是一个高阶马尔科夫决策过程。令  $P_{jk}$  为该用户在下一次带宽分配时分配到带宽序号为  $k$  的转移概率,  $P_{jk}$  可通过对信道带宽分配的统计结果得到。由转移概率  $P_{jk}$  组成的一步转移概率矩阵为  $\mathbf{P}$ 。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \dots & P_{MN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

为了研究信道变化率, 引入一个新的指标  $l$ 。

$$l = \frac{\max_{j=1}^N (\Delta p_{ij}) N}{\sum_{j=1}^N (\sum_{i=1}^N p_{ij})} \quad (5)$$

式中:  $l$  为信道变化率;  $\max(\Delta p_{ij})$  表示矩阵中质量变化最大值;  $N$  表示网络中用户量。

根据低压电力线信道的时变特性, 一个时间单元的状态会对下一个时间单元的转移概率有影响,

即  $P_{jk}$  的值在转移过程中是不断变动的, 而  $P_{jk}$  的变化会给带宽分配结果带来不可预估的变化<sup>[17-18]</sup>。在单时间周期的带宽分配中, 分配的情况  $v_j$  是指从状态  $j$  开始的最优带宽分配结果。在整个时间轴上, 对于带宽分配结果的集合  $v = [v_0, v_1, \dots, v_{n-1}]^T$  和分配结果的通信质量评估值  $c^{(k)} = [c_0^{(k)}, c_1^{(k)}, \dots, c_{n-1}^{(k)}]^T$ , 根据无穷视野无约束的随机动态规划模型<sup>[19]</sup>, 有

$$\max x_0 = \sum_{i=0}^{n-1} v_i \quad (6)$$

$$\text{s.t. } v \geq c^{(l)} - d\bar{1} + \alpha \mathbf{P}^{(l)} v \\ v \geq \bar{0} \quad (7)$$

式中:  $v_i$  表示满足约束的最大值;  $x_0$  表示这些最大值的总和;  $v$  表示带宽分配结果的集合;  $c^{(l)}$  表示通信质量评估值;  $\bar{1}(\bar{0})$  表示所有元素都为 1(0) 的  $n$  维列向量;  $d$  表示每个周期变化造成的系统资源(即带宽资源)变化;  $\alpha$  表示无穷视野带折扣因子;  $\mathbf{P}^{(l)}$  表示每个周期变化率为  $l$  时的一步转移矩阵。

### (2) 最优平稳带宽分配策略的求解

为了得到最佳的带宽分配效果, 考虑研究 2 个时间单元周期变化率为  $l$  的子问题, 由单步删除策略<sup>[20]</sup>, 分配情况在 1 个时间单元后的中间形式可表示为

$$v = c^{(l)}(2) + \alpha \mathbf{P}^{(l)} v' \quad (8)$$

式中:  $c^{(l)}$  表示信道特性不发生变化时带宽分配结果的通信质量评估值;  $v'$  表示信道特性不发生变化的情况下, 无穷视野的分配情况的集合。

当在第二个时间单元信道变化率不为  $l$  时, 在 1 个时间单元后, 按照转移矩阵  $\mathbf{P}^{(l)}$  得到相同的评估效果  $c^{(l)}(2)$ , 由单步删除策略, 则有

$$v' = c^{(l)}(2) + \alpha \mathbf{P}^{(l)} v \quad (9)$$

联立式(8)和式(9), 可得

$$v = c^{(l)}(2) + \alpha \mathbf{P}^{(l)} (c^{(l)}(2) + \alpha \mathbf{P}^{(l)} v) \quad (10)$$

由归纳法可得到不等式:

$$v \geq (\bar{1} + \alpha \mathbf{P}^{(l)} + \dots + (\alpha \mathbf{P}^{(l)})^{r-1}) c^{(l)}(r) + (\alpha \mathbf{P}^{(l)})^r v \quad (11)$$

根据平稳策略定理<sup>[21-23]</sup>, 给定一个无穷视野带折扣因子  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) 的马尔科夫决策过程, 对每一对  $h, i$ , 信道变化率为  $l_{hi}$ , 使

$$\max_{k \in A_i} \left\{ q_i^{(l)} + \alpha \sum_{j=0}^{n-1} p_{hij}^{(l)} v_j \right\} = q_j^{(l_{hi})} + \alpha \sum_{j=0}^{n-1} p_{hij}^{(l)} v_j \quad (12)$$

定义平稳策略  $D$ ,  $D(h, i) = l_{hi}$ , 对于每一对  $h, i$ , 有  $\omega_{hi}(D) = v_{hi}$ , 其中,  $j$  表示第  $j$  段带宽范围;  $v_{hi}$  为时间单元  $h, i$  的最优平稳带宽分配策略。

最终, 带宽分配问题转化为线性规划问题, 只要求解下面的线性规划问题就能得到最优平稳带宽分配策略:

$$\max \{x_{0,0} + x_{0,1} + \cdots + x_{0,n-1} + x_{1,n-1} + \cdots + x_{n-1,n-1}\} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } x_{hi} \geq q_j^{(l)} + \alpha \sum_{j=0}^{n-1} p_{hij}^{(l)} x_{ij}, h, i = 0, 1, \cdots, n-1, l \in A_i \quad (14)$$

求解式(13)和式(14), 得到优化的  $v$  就是最优平稳带宽分配策略。

为了检验带宽分配结果, 定义约束条件: 在  $Q$  达到标准的情况下检验通信质量最差的用户是否满足通信需求, 即  $Q_{\min}$  的值应不小于阈值  $Q_{th}$ ,  $Q_{th}$  的值由用户需求所决定<sup>[24-26]</sup>。

为了满足上述的条件, 且考虑到通信质量评估值为越大越优值, 应该调整最优平稳带宽分配策略的约束条件, 修改后的最优平稳带宽分配策略可表述为

$$\max \{x_{0,0} + x_{0,1} + \cdots + x_{0,n-1} + x_{1,n-1} + \cdots + x_{n-1,n-1}\} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \text{s.t. } x_{hi} \geq q_j^{(l)} + \alpha \sum_{j=0}^{n-1} p_{hij}^{(l)} x_{ij}, h, i = 0, 1, \cdots, n-1, l \in A_i \\ \min \quad c_{hi} > 0 \end{cases} \quad (16)$$

求解式(15)和式(16), 即可得到基于动态规划模型的低压电力线通信带宽分配策略。

### 3 策略自适应调整方案

低压电力线通信信道的信道特性变化不剧烈, 所以它是一种慢时变信道, 因此, 在信道变化率低时, 带宽分配结果是持续有效的<sup>[27]</sup>。为了提高低压电力线通信带宽分配策略的自适应性, 应减少该策略对系统的资源占用。

为了研究实时测试的低压电力线通信信道变化率带来的系统资源占用问题, 将信道变化率转化为时间变量, 引入一个新的指标  $z$ 。

$$z = \frac{l}{t_l} \quad (17)$$

式中:  $z$  表示单位时间内低压电力线通信信道变化率;  $t_l$  表示信道变化率为  $l$  时所用的时间。

由式(17)可获得基于低压电力线信道变化率的带宽分配策略自适应调整方案的调整周期  $T_l$ 。

$$T_l = \frac{L}{z} \quad (18)$$

式中,  $L$  为信道变化率  $l$  引起分配结果发生变化的临界值。所以, 在周期  $T_l$  时间内调整一次带宽分配策略, 即可达到低压电力线通信带宽自适应分配的目的。

## 4 仿真结果与分析

将无穷视野无约束的随机动态规划模型导入仿真软件, 建立随机动态规划模型以求得带宽自适应分配的最优结果。多用户网络可分成多个集合, 集合之间和集合内的用户仍可利用随机动态规划模型进行带宽分配。为了验证算法的可行性, 对一个具有 5 个用户的网络进行仿真, 生成随机矩阵  $A$  作为质量评估二维矩阵, 根据带宽分配策略可知带宽分配结果有 120 种, 仿真软件随机得到质量评估二维矩阵如式(19)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 0.906 & 0.501 & 0.894 & 0.714 & 0.731 \\ 0.628 & 0.432 & 0.138 & 0.618 & 0.647 \\ 0.102 & 0.998 & 0.390 & 0.343 & 0.833 \\ 0.391 & 0.812 & 0.927 & 0.936 & 0.398 \\ 0.055 & 0.486 & 0.917 & 0.125 & 0.750 \end{bmatrix} \quad (19)$$

以  $A$  矩阵作为质量评估二维矩阵进行仿真, 仿真得到的 120 中带带宽分配结果如图 2 所示。

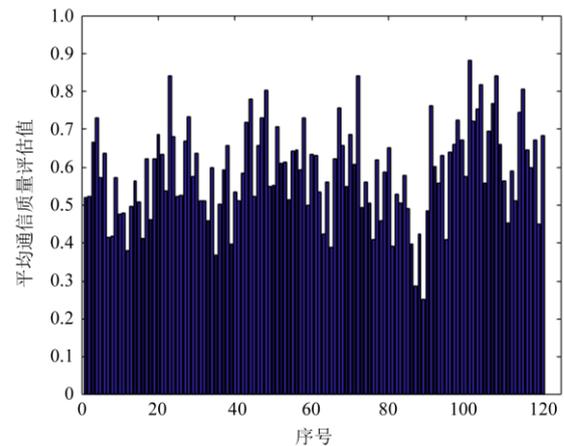


图 2 带宽分配结果

Fig. 2 Results of bandwidth allocation

图 2 为带宽分配的所有结果及其对应的平均通信质量评估值, 对带宽分配结果仿真寻优可以得到: 用户的最优分配矩阵为  $v = [1 \ 5 \ 2 \ 4 \ 3]$ , 最优矩阵为  $c = [0.906 \ 0.647 \ 0.998 \ 0.927 \ 0.917]$ , 5 个用户平均质量评估值为 0.879, 5 个用户中最差通信质量评估值为 0.647, 满足约束条件。

经过算法优化后, 随着筛除比例不断增加, 算法的计算复杂度变化规律分别如图 3—图 6 所示。

由图 3—图 6 可以看出: 算法的计算复杂度随筛除率升高而降低, 降低的幅度呈越来越小的趋势, 并且总能保留较优的带宽分配结果。

为了将这种趋势更为直观地表现出来, 进一步研究了筛除率对算法计算复杂度的影响, 如图 7 所示。

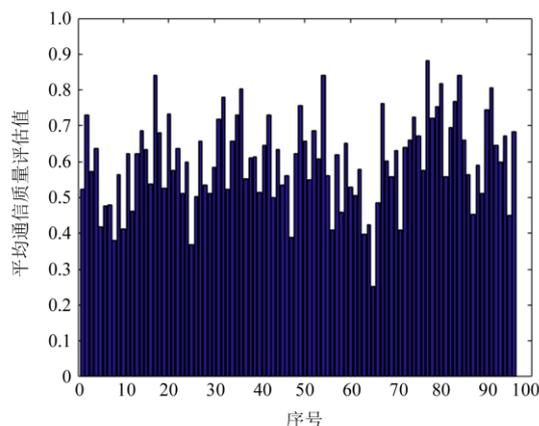


图3 筛除率为 4% 时的带宽分配结果

Fig. 3 Results of bandwidth allocation with 4% screening rate

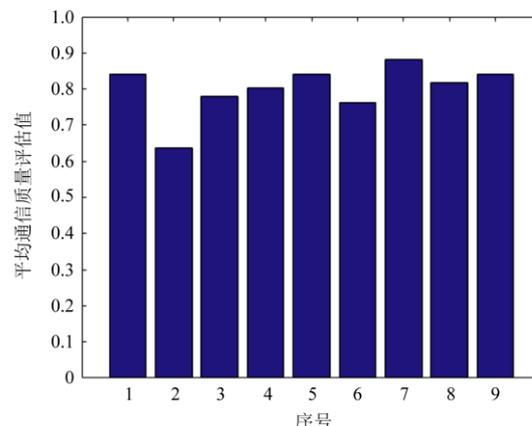


图6 筛除率为 40% 时的带宽分配结果

Fig. 6 Results of bandwidth allocation with 40% screening rate

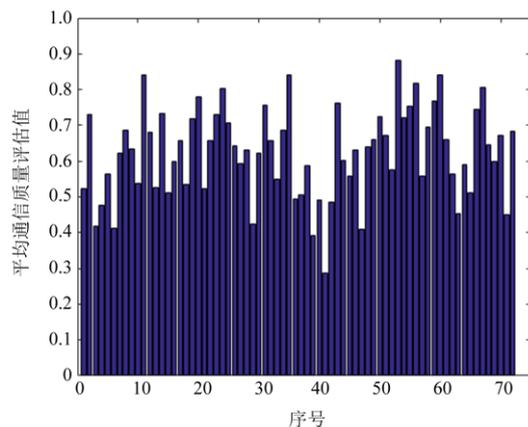


图4 筛除率为 8% 时的带宽分配结果

Fig. 4 Results of bandwidth allocation with 8% screening rate

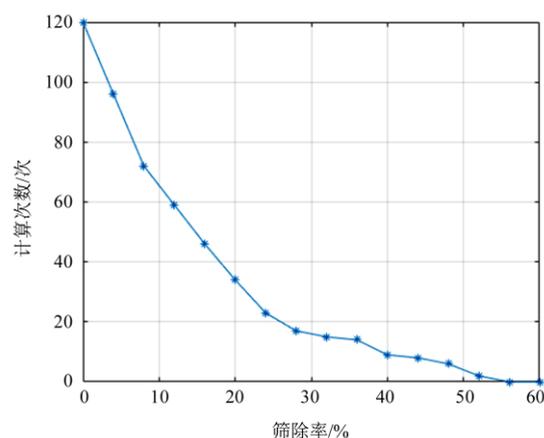


图7 筛除率对算法计算复杂度的影响

Fig. 7 Influence of screening rate on the computational complexity of the algorithm

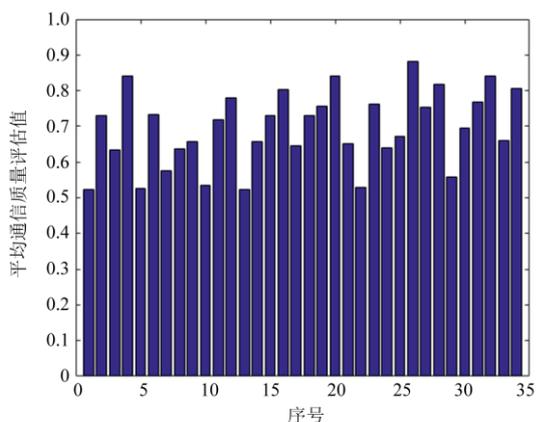


图5 筛除率为 20% 时的带宽分配结果

Fig. 5 Results of bandwidth allocation with 20% screening rate

由图7可以看出:当筛除率在20%~36%范围内时,可以在保留可用带宽分配结果的条件下,有效降低算法的计算复杂度。在筛除率为40%时,带宽分配结果仅有9种,虽然降低了92.5%的算法计算复杂度,但会明显影响带宽分配结果的寻优过程。

为了得到更为普遍性的结果,随机生成多个质量评估二维矩阵进行仿真,以研究数据筛除率对算法计算复杂度影响的规律,如图8所示。

由图8可以看出:数据筛除率在20%~30%时能够降低70%及以上的算法计算复杂度,且不影响带宽分配策略的寻优。所以,在进行带宽分配前完成20%~30%的数据筛除,就能占用尽量少的系统资源且得到较为理想的分配结果。在数据筛除率超过30%时,可能影响寻优过程。

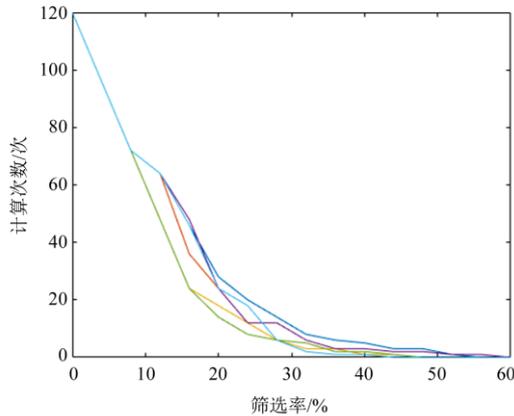


图 8 筛除率对算法计算复杂度影响的规律

Fig. 8 Law of the influence of screening rate on the computational complexity of the algorithm

基于动态规划模型的带宽分配策略在低压电力  
线信道发生变化时，带宽分配结果随信道变化率的

周期变化规律如表 1 所示。

由表 1 可以看出：当信道变化率较小( $l \leq 0.25$ )  
时，信道的带宽分配结果仍保持不变，当信道变化  
率较大( $l > 0.25$ )时，信道的带宽分配结果发生

变化。为了进一步了解信道变化率和带宽分配结果  
的关系，研究了带宽分配结果随周期信道变化率  
的多周期变化规律，如图 9—图 14 所示。

由图 9—图 12 可以看出：带宽分配结果的平均  
值和最小值的变化随周期信道变化率  $l$  的增大越  
来越剧烈，最优策略的转换越来越频繁(虚线处表示分  
配策略在周期内发生了转变)。

由图 13—图 14 可以看出：同样在 20 个周期内，  
在周期变化率  $l=0.20$  时，带宽分配结果只变动了  
3 次；在周期变化率  $l=0.25$  时，带宽分配结果变动  
了 13 次。周期变化率  $l$  仅增加 0.05，带宽分配结  
果的变动次数在 20 个周期内增加了 10 次，分配结  
果的周期变化次数猛然增多，而这些变化的分配结  
果之间的联系却是未知的。

表 1 信道变化率为  $l$  时，最优分配的结果

Table 1 Result of optimal allocation when channel change rate is  $l$

$l$ 取值	最优分配结果 $v$	最优矩阵 $c$	平均值	最差值
$l=0.01$	[1 5 2 4 3]	[0.906 0.647 0.998 0.927 0.917]	0.879	0.647
$l=0.05$	[1 5 2 4 3]	[0.888 0.607 0.960 0.935 0.870]	0.852	0.607
$l=0.10$	[1 5 2 4 3]	[0.863 0.642 0.940 0.918 0.877]	0.848	0.642
$l=0.15$	[1 5 2 4 3]	[0.868 0.632 0.946 0.911 0.828]	0.837	0.632
$l=0.20$	[1 5 2 4 3]	[0.906 0.660 0.908 0.936 0.941]	0.870	0.660
$l=0.25$	[1 5 2 4 3]	[0.906 0.647 0.978 0.936 0.904]	0.874	0.647
$l=0.30$	[1 4 2 3 5]	[0.906 0.798 0.777 0.934 0.750]	0.833	0.750
$l=0.35$	[1 4 2 3 5]	[0.906 0.696 0.987 0.812 0.750]	0.830	0.696
$l=0.40$	[3 1 2 4 5]	[0.944 0.643 0.956 0.936 0.750]	0.846	0.643

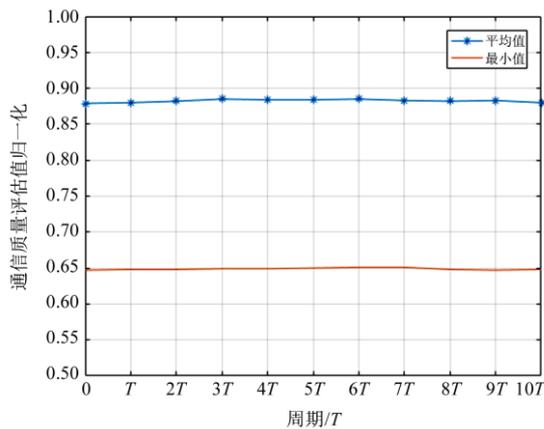


图 9 周期变化率  $l=0.01$  时，带宽分配结果随周期信道  
变化率的变化规律

Fig. 9 Variation of bandwidth allocation result with periodic  
channel change rate when periodic change rate  $l=0.01$

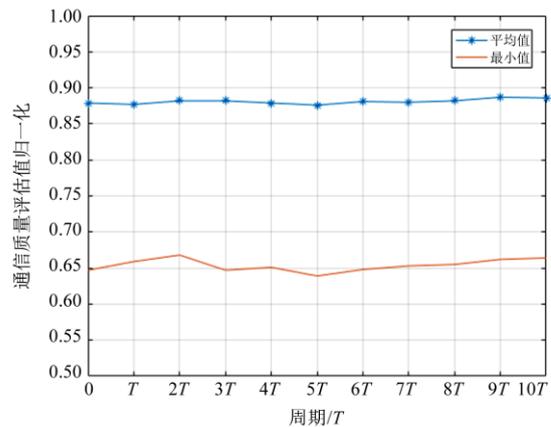


图 10 周期变化率  $l=0.05$  时，带宽分配结果随周期信道  
变化率的变化规律

Fig. 10 Variation of bandwidth allocation result with periodic  
channel change rate when periodic change rate  $l=0.01$

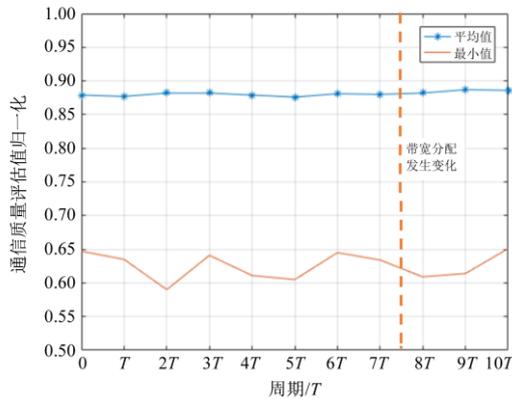


图 11 周期变化率  $l=0.10$  时, 带宽分配结果随周期信道变化率的变化规律

Fig. 11 Variation of bandwidth allocation result with periodic channel change rate when periodic change rate  $l = 0.10$

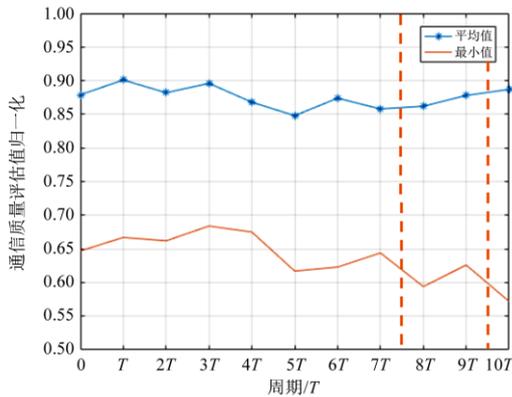


图 12 周期变化率  $l=0.15$  时, 带宽分配结果随周期信道变化率的变化规律

Fig. 12 Variation of bandwidth allocation result with periodic channel change rate when periodic change rate  $l = 0.15$

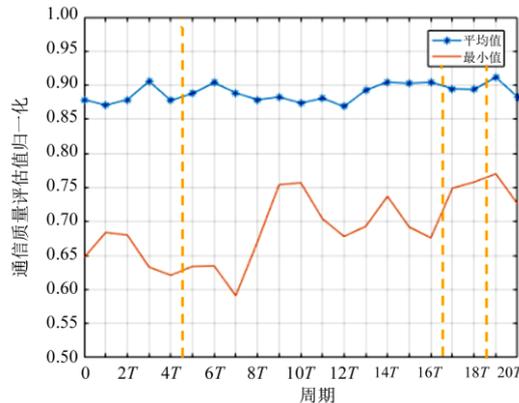


图 13 周期变化率  $l=0.20$  时, 带宽分配结果随周期信道变化率的变化规律

Fig. 13 Variation of bandwidth allocation result with periodic channel change rate when periodic change rate  $l = 0.20$

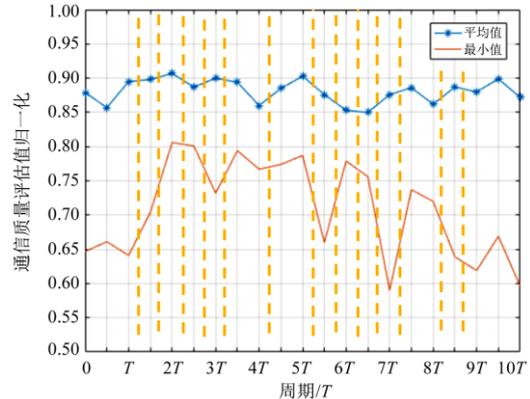


图 14 周期变化率  $l=0.25$  时, 带宽分配结果随周期信道变化率的变化规律

Fig. 14 Variation of bandwidth allocation result with periodic channel change rate when periodic change rate  $l = 0.25$

为了进一步研究带宽分配结果的变化, 将可能出现的带宽分配结果的序号变化绘制如图 15 所示。

由图 15 可以看出: 在  $l=0.25$  时, 最优带宽分配结果虽然转变了 13 次, 但最优带宽分配结果总是在序号为 23、67、72、101、104、108 的 6 个带宽分配结果之间转换, 并且它们都存在于筛除率为 32% 的带宽分配结果中。所以在筛除率低于 30% 时, 不会影响一定周期内的寻优过程。

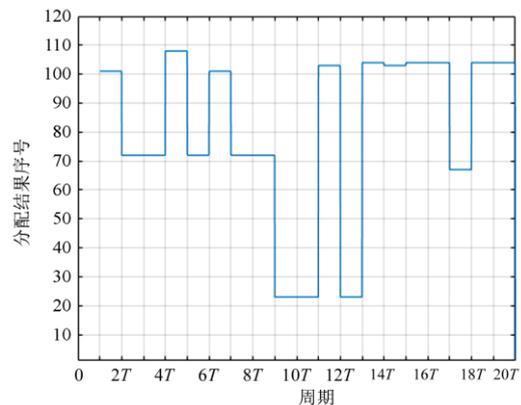


图 15 带宽分配结果序号变化

Fig. 15 Serial number change of bandwidth allocation result

这说明: 在低压电力线这种慢时变的信道中, 可将低压电力线通信信道变化率的阈值  $L$  设为 0.25, 在信道变化率可能达到阈值的周期内, 带宽分配可以保持不变。在筛除率低于 30% 时, 不会影响一定周期内的寻优过程。

## 5 结语

基于动态规划模型的低压电力线通信带宽自适应分配策略(DBA-PLC)属于一种状态报告型 DBA

算法,它的决策变量是低压电力线通信质量评估值,约束条件为用户通信质量评估的平均值和最低值,能够通过通信评估值对带宽分配结果进行递推寻优,再加上相匹配的以优化算法为目的的数据筛除方式,使分配策略的可行性和分配效率进一步提升。经过仿真验证,这种带宽自适应分配策略能够以逐段递推寻优的方式,有效地进行带宽的自适应分配,在数据筛除率为 20%~30%时,能够在降低算法 70%及以上计算复杂度的情况下,得到较为理想的分配结果,而且分配结果在信道变化率低于阈值的情况下持续有效。

### 参考文献

- [1] ABIED H J, DHAINI A R. Deep learning-based dynamic bandwidth allocation for future optical access networks[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 97307-97318.
- [2] 何奉禄, 陈佳琦, 李钦豪, 等. 智能电网中的物联网技术应用与发展[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 58-69.  
HE Fenglu, CHEN Jiaqi, LI Qin hao, et al. Application and development of internet of things technologies in smart grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 58-69.
- [3] 谢文旺, 孙云莲, 易仕敏, 等. 一种基于改进 VPGA 优化 Elman 神经网络的电力线通信数据处理算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(6): 58-65.  
XIE Wenwang, SUN Yunlian, YI Shimin, et al. A data processing algorithm for power line communication based on Elman neural network optimized by improved VPGA[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(6): 58-65.
- [4] BAI Xiangwei, LI Qing. Performance analysis of bandwidth allocation based on dynamic user priority for indoor visible light communication ultra-dense networks[J]. *Electronics*, 2019, 8(3): 1-18.
- [5] TORRES E, REALE R, SAMPAIO L. A SDN/OpenFlow framework for dynamic resource allocation based on bandwidth allocation model[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2020, 18(5): 853-860.
- [6] 李龙飞, 王剑峰, 刘欢, 等. 硬件支持的多虚拟机数据交换及动态带宽分配方法[J]. *微电子学与计算机*, 2020, 37(1): 93-98.  
LI Longfei, WANG Jianfeng, LIU Huan, et al. Hardware supported methods of multi-VM switching and dynamic bandwidth allocation[J]. *Microelectronics and Computer*, 2020, 37(1): 93-98.
- [7] 黄宇栋, 刘宏立, 谭周文, 等. 周期时变信道特性的宽带电力线比特功率分配算法[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(3): 128-131.
- [8] HUANG Yudong, LIU Hongli, TAN Zhouwen, et al. Bit-loading and power allocation algorithm for LPTV channel for BPLC systems[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(3): 128-131.
- [9] 李正杰, 谢军伟, 张浩为, 等. 基于集中式 MIMO 雷达的功率带宽联合分配算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(5): 1041-1049.  
LI Zhengjie, XIE Junwei, ZHANG Haowei, et al. Joint power and bandwidth allocation algorithm based on centralized MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronic*, 2020, 42(5): 1041-1049.
- [10] 姜晶. 面向大数据应用的自适应带宽分配策略[J]. *武器装备工程学报*, 2019, 40(7): 128-132.  
JIANG Jing. Flexible bandwidth allocation-based data transmission for big data[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(7): 128-132.
- [11] 沈燕, 万夕里, 蔚承建, 等. 面向用户需求的无线带宽优化分配算法[J]. *计算机工程与设计*, 2019, 40(12): 3401-3406.  
SHEN Yan, WAN Xili, WEI Chengjian, et al. Optimal allocation algorithm of wireless bandwidth for user requirements[J]. *Computer Engineering and Design*, 2019, 40(12): 3401-3406.
- [12] LIU Bo, ZHANG Lijia. Adaptive dynamic wavelength and bandwidth allocation algorithm based on error-back-propagation neural network prediction[J]. *Optics Communications*, 2019, 413(15): 276-284.
- [13] 袁欣, 陶桦, 朱立纬. 网络出口资源受限的自适应带宽分配策略[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56(3): 463-468.  
YUAN Xin, TAO Hua, ZHU Liwei. Resource-constrained adaptive dynamic bandwidth allocation[J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2019, 56(3): 463-468.
- [14] CHEN Haoyong, WANG Xiaojuan, LI Zhihao, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [15] 蔡少阳, 陈力, 王卫东. 一种用于可见光通信的自适应 OFDM 系统设计与试验[J]. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(1): 137-143.  
CAI Shaoyang, CHEN Li, WANG Weidong. Design and experiments of an adaptive OFDM system for visible light communication[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 35(1): 137-143.
- [16] JI-HYOUNG K, KWANWOONG K. System design of

- high-definition media transceiver based on power line communication and its performance analysis[J]. Proceedings of Electrical Society ABCD, 2010, 59(1): 192-196.
- [16] 杨蓉, 曹旺斌, 尹成群. 基于自适应遗传算法的 PLC 信道动态子载波分配[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 111-116.  
YANG Rong, CAO Wangbin, YIN Chengqun. PLC channel dynamic subcarrier allocation based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 111-116.
- [17] TORRES E, REALE R, SAMPAIO L, et al. A SDN/OpenFlow framework for dynamic resource allocation based on bandwidth allocation model[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(5): 853-860.
- [18] 蒲红红, 刘晓胜, 韩铭, 等. 电力线通信信道下协作非正交多址接入系统的分布式机会中继选择[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2306-2318.  
PU Honghong, LIU Xiaosheng, HAN Ming, et al. Distributed opportunistic relay selection for cooperative non-orthogonal multiple access power line communication networks[J]. Electric Engineering, 2020, 35(11): 2306-2318.
- [19] HO J M, HSIU P C, CHEN M S. Deadline flow scheduling in datacenters with time-varying bandwidth allocations[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2020, 13(3): 437-450.
- [20] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.  
CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [21] 李沛哲, 肖振锋, 陈仲伟, 等. 电力终端通信接入网通信技术匹配[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 125-134.  
LI Peizhe, XIAO Zhenfeng, CHEN Zhongwei, et al. Communication technology matching of power terminal communication access network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 125-134.
- [22] 李岩, 齐磊杰, 刘云鹏. 具有公共屏蔽层的三芯中压电缆通信信道分析[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 101-106, 113.  
LI Yan, QI Leijie, LIU Yunpeng. Communication channel analysis of three core medium voltage cable with public shielding layer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 101-106, 113.
- [23] 石智永, 侯尽然, 管晓峰, 等. 电力线宽带载波通信干扰过滤技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 75-80.  
SHI Zhiyong, HOU Quanran, GUAN Xiaofeng, et al. Research on interference filtering technology of power line broadband carrier communication[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 75-80.
- [24] 王勇, 张明, 马洲俊, 等. 电力线信道通信特性影响因素分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(3): 157-164.  
WANG Yong, ZHANG Ming, MA Zhoujun, et al. Analysis of the factors influencing the communication characteristics of power line channel[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3): 157-164.
- [25] PICORONE A A M, DE OLIVEIRA T R. SAMPAIO-NETO R, et al. Channel characterization of low voltage electric power distribution networks for PLC applications based on measurement campaign[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 116.
- [26] 周楠, 张平, 郑征, 等. 基于机器学习的电力通信网带宽分配算法[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(5): 67-73.  
ZHOU Nan, ZHANG Ping, ZHENG Zheng, et al. Power communication network bandwidth allocation algorithm based on machine learning[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 67-73.
- [27] FERNÁNDEZ I, VEGA D, ARRINDA A, et al. Field trials for the characterization of non-intentional emissions at low-voltage grid in the frequency range assigned to NB-PLC technologies[J]. Electronics, 2019, 8(9).
- 
- 收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-05-31  
作者简介:  
魏绍亮(1969—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为煤矿井下电力线信号传输与提取、机电一体化; E-mail: wsl\_ify@163.com  
张 帅(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为低压电力线通信技术、智能检测与设备诊断。E-mail: ChillaxSs@163.com
- (编辑 魏小丽)