

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201037

# 多跳中继宽带电力线通信网络中的 OFDM 跨层资源分配

史建超, 谢志远, 胡正伟, 曹旺斌

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 为保障宽带电力线通信网络的有效性和可靠性, 提出一种综合多跳中继宽带电力线通信网络的业务层、网络层、介质访问控制(Media Access Control, MAC)层和物理层信息的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)跨层资源分配方法。首先建立综合跨层信息的 MAC 层数据包调度效用值模型和基于公平性阈值控制的物理层子载波分配模型。提出为满足各用户服务质量需求的 MAC 层高效用值数据包优先调度准则。再将该模型和准则应用于宽带电力线通信网络各交叉节点的资源分配过程中。最后在典型电力线信道环境下对所提算法及对比算法进行仿真。仿真结果表明所提算法能够保证实时用户与非实时用户的通信速率和时延的服务质量需求, 且具有较大的系统吞吐量和较好的时延特性, 有效解决了多跳中继宽带电力线通信网络的 OFDM 资源分配问题。

**关键词:** 多跳中继网络; 宽带电力线通信; OFDM; 资源分配; 能源互联网

## OFDM cross layer resource allocation in multi-relay broadband power line communication networks

SHI Jianchao, XIE Zhiyuan, HU Zhengwei, CAO Wangbin

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China)

**Abstract:** To ensure the effectiveness and reliability of a broadband power line communication network, an Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) cross layer resource allocation method is proposed. It integrates the information of the service, network, Media Access Control (MAC) and physical layers of a multi-hop relay broadband power line communication network. First, the utility value model of packet scheduling in the MAC layer and the subcarrier allocation model in the physical layer, based on fairness threshold control, are established. A priority scheduling criterion of packets with higher efficiency value in the MAC layer is proposed to meet the service quality requirements of each user. Then, the model and criteria are applied to the resource allocation of cross-nodes in broadband power line communication networks. Finally, the proposed and comparison algorithms are simulated in a typical power line channel environment. Simulation results show that the proposed algorithm can meet the service quality requirements of real-time users and non-real-time users in terms of communication rate and delay. It has larger system throughput and better delay characteristics. Thus the OFDM resource allocation problem in a multi-hop relay broadband power line communication network is solved in an effective manner.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2019502186) and the Science and Technology Planning Project of Hebei Province (No. 17211704D).

**Key words:** multi-hop relay network; broadband power line communication; OFDM; resource allocation; energy internet

## 0 引言

电力线通信是未来能源互联网建设中的重要通信方式之一<sup>[1]</sup>, 具有覆盖范围广、成本较低、无需

考虑通信设备的电力供应等优势, 在远程控制与监测、自动抄表、智慧城市、宽带接入等领域应用广泛<sup>[2]</sup>。随着技术发展, 传统窄带低速电力线通信已不能满足现代电网的通信需求, 宽带电力线通信(Broadband Power Line Communication, BPLC)较之具有更高的通信速率, 保障宽带电力线通信网络的覆盖范围和高速传输, 必将带来重大的经济效益与

基金项目: 河北省自然科学基金项目资助(E2019502186);  
河北省科技计划项目资助(17211704D)

社会效益<sup>[3]</sup>。

正交频分复用技术是实现宽带电力线通信数据高速传输的核心技术之一<sup>[4]</sup>, 根据宽带电力线信道频率选择性衰落和时变性的特点, 合理分配子载波资源, 可以有效提高系统传输效率。已有一些对 OFDM 资源分配的研究, 文献[5]提出一种基于改进遗传算法的电力线通信 OFDM 子载波分配算法, 提高了单用户情况下的信道容量; 文献[6]提出了一种动态调整的比例公平算法, 提高了 OFDM 通信系统的整体吞吐量, 并且在多用户资源分配中具有公平性, 但是并没有考虑各用户的服务质量(Quality of Service, QoS)需求; 文献[7]提出一种多用户电力线通信资源优化调度模型, 达到了较好的调度效率和公平性, 但其没有考虑不同用户业务类型的差异性。在进行 OFDM 通信系统资源分配时, 仅考虑物理层子载波的最优分配而忽视用户信息是很难满足用户服务质量需求的, 因此资源分配的跨层设计显得尤为重要。文献[8]提出一种系统资源无法满足所有业务通信速率需求情况下的跨层资源分配算法, 保证了实时业务传输的稳定性和非实时业务传输的公平性, 但是在信道质量较好时无法充分利用系统资源。文献[9]提出了一种在系统资源临界满足情况下的跨层资源分配算法, 通过拒绝接入由于时变性导致信道状态较差的用户, 满足了用户的通信速率需求, 但未分析用户 QoS 需求中的时延因素, 无法保证数据传输符合用户的时延需求。此外, 由于宽带电力线通信信道环境复杂<sup>[10-16]</sup>, 信号在远距离传输时衰减严重, 且其传输功率受到相关电磁兼容法规限制<sup>[17-19]</sup>, 故需采用多路由中继方式扩大宽带电力线通信网络的覆盖范围<sup>[20-23]</sup>。以上资源分配算法都假设网关节点经过具有透明传输功能的中继器到达用户终端设备, 没有分析通信网络层的多路由中继问题对 OFDM 系统资源分配的影响, 即未充分考虑网络层的路由信息。

针对以上 OFDM 资源分配算法的不足, 本文综合考虑物理层、MAC 层、网络层和业务层信息, 提出一种多跳中继宽带电力线通信网络 OFDM 跨层资源分配(Cross layer resource allocation of OFDM in multi-hop relay broadband power line communication networks, MR-CLRA)算法。根据跨层信息优化电力线通信网络的 OFDM 分配过程, 以保证多用户通信速率和时延服务质量需求并最大化系统吞吐量, 最后通过与对比算法的仿真实验验证了 MR-CLRA 算法的有效性和优越性。

## 1 宽带电力线网络拓扑及信道模型

低压配电网的拓扑结构复杂多变, 总体上是基于树形的混合拓扑结构<sup>[24]</sup>, 某典型多用户宽带电力线通信网络拓扑如图 1 所示。其中节点 1 是网络中心节点, 节点 2、4、5、7、9、12 是中继路由节点, 其他节点是用户终端节点。

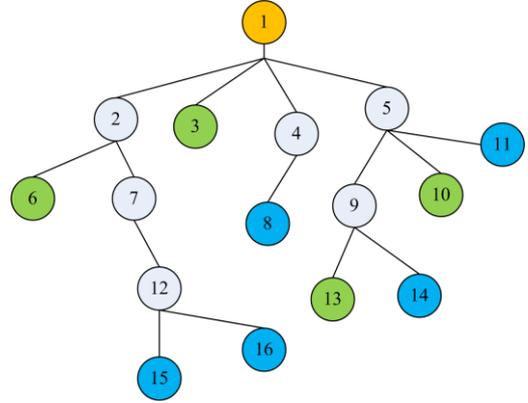


图 1 某典型宽带电力线通信网络拓扑结构

Fig. 1 Topology of a typical broadband power line communication network

受电力线通信环境影响, 其通信质量呈动态非平稳变化, 为了减小噪声、衰减、电磁干扰等因素对电力线通信系统的影响, 需要深入研究电力线信道特性, 对电力线信道进行建模。将信道衰减、阻抗不匹配及干扰时变性等因素用一个时变滤波器表示, 则宽带电力线信道模型如图 2 所示。由于电力线网络分支较多且存在阻抗不匹配现象, 其信道特性具有低通和频率选择性衰落的特征, 所以可以用多径衰减模型描述宽带电力线信道的传输特性<sup>[25]</sup>, 建立多径模型如式(1)所示。

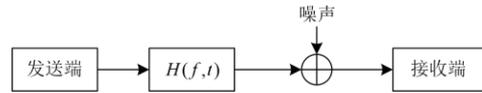


图 2 宽带电力线信道模型

Fig. 2 Model of the broadband power line channel

$$H(f) = \sum_{j=1}^n g_j \cdot e^{-(a_0 + a_1 f^m) d_j} \cdot e^{-j2\pi f \frac{d_j}{v_p}} \quad (1)$$

式中:  $n$  为路径数;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $m$  为电力线的衰减参数;  $g_j$  为路径  $j$  的衰减系数;  $d_j$  为路径  $j$  的长度;  $v_p$  为信号在电力线上的传播速度。参数  $n$  可控制信道模型的精度, 较大的路径数  $n$  可以更精确地模拟信号在电力线信道内的多径传播情况。式(1)对电力线信道的多径和衰减特性的描述具有一般性, 故采用多

径衰减模型描述电力线信道传输特性,用于分析宽带电力线 OFDM 通信系统的资源分配和信道容量。

宽带电力线通信环境中存在着多种噪声,总体上可以分为有色背景噪声和脉冲干扰,其中与电力线 OFDM 资源分配有关的主要是有色背景噪声,宽带电力线上有色背景噪声的强度随着频率的增高而减小,其模型<sup>[26]</sup>如式(2)所示。

$$A(f) = A_\infty + A_0 e^{-f/f_0} \quad (2)$$

式中:  $A_\infty$  为频率趋于无穷大时的噪声功率谱密度;  $A_0$  为频率趋于零时与趋于无穷大时的功率谱密度差值;  $f_0$  为衰减系数。

## 2 宽带电力线 OFDM 跨层资源分配模型

### 2.1 MAC 层数据包调度效用值模型

在多跳中继电力线通信网络中,跨层资源分配算法综合各层信息用于系统资源的最优配置,满足各用户在业务层的通信速率和时延约束,并最大化系统信道容量。将业务层的用户类型和 QoS 约束信息、网络层的通信链路和节点信息映射到 MAC 层调度算法,建立数据包调度效用值模型,是跨层资源分配中承上启下的关键所在。参考文献[8]中对宽带电力线通信业务源的建模,设中心节点各用户数据包的到达服从泊松分布,如式(3)所示。

$$P(T_s) = (\lambda_u T_s)^{A_u(t)} e^{-\lambda_u T_s} / A_u(t)! \quad (3)$$

式中:  $T_s$  为传输周期;  $\lambda_u$  为数据包到达率;  $A_u(t)$  为在第  $t-1$  个时隙内用户  $u$  到达的数据量;  $P(T_s)$  为其概率。由泊松分布的性质可知,第  $t-1$  个时隙到达分组数如式(4)所示。

$$A_{u,avg}(t) = E\{A_u(t)\} = \lambda_u \quad (4)$$

式中,  $E\{A_u(t)\}$  为  $A_u(t)$  的期望,在第  $t$  个时隙即  $[tT_s, (t+1)T_s]$  内用户  $u$  发送的数据量为  $r_u(t)$ ,为每个用户分配一个数据缓冲区,则用户  $u$  在  $t+1$  时刻的队列长度  $L_u(t+1)$  如式(5)所示。

$$L_u(t+1) = L_u(t) + A_u(t+1) - r_u(t) \quad (5)$$

根据排队论的 little 定理,用户  $u$  数据队列的第  $k$  个数据包在  $t$  时刻的平均等待时间  $S_{u,k}(t)$  如式(6)所示,其效用值  $W_{u,k}$  如式(7)所示,效用值反映了各用户 QoS 需求和数据分组队列信息,可以根据各用户队列数据包的效用值确定 MAC 层数据包的调度优先级,指导物理层的子载波分配。

$$S_{u,k}(t) = E\{L_u(t)\} / \lambda_u \quad (6)$$

$$W_{u,k} = \begin{cases} \frac{R_{QoS}(u) S_{u,k}(t)}{R_u(t) D(u)}, & S_{u,k}(t) \leq D(u) \\ \text{Timeout}, & S_{u,k}(t) > D(u) \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $R_{QoS}(u)$  为用户  $u$  的 QoS 速率需求;  $R_u(t)$  为用户  $u$  当前的平均通信速率;  $D(u)$  代表其可以承受的最长等待时延。  $D(u)$  如式(8)所示。

$$\begin{cases} D(u) = D_u - D_{u1} - D_{u2} - D_{u3} \\ D_{u1} = S_{frame} / C \\ D_{u2} = d / v_s \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D_{u1}$ 、 $D_{u2}$  分别为数据包从中心节点到用户  $u$  的传输时延和传播时延;  $S_{frame}$  为数据帧长度;  $C$  为数据帧的传输速率;  $d$ 、 $v_s$  分别为传播距离和电信号的传播速度;  $D_u$  为满足用户  $u$  服务质量需求的最大路径时延;  $D_{u3}$  为用户  $u$  的数据包在其通信路径上已经产生的队列时延。由式(7)可知,用户的 QoS 速率需求越高,可以承受的等待时延越小,其数据包调度效用值越大;根据已分配资源所求得的瞬时平均速率越大,数据包已等待时间越小,其数据包调度效用值越小。

### 2.2 物理层子载波分配模型

为了充分利用电力线 OFDM 系统的多用户分集增益,提高频谱利用率,在 BPLC 通信网络中构建物理层资源分配模型,在满足公平性阈值约束的前提下使系统总吞吐量最大化。跨层资源分配算法对物理层各子载波采用等功率分配方案,为限制电力线通信的电磁干扰,其总发射功率需符合一定功率谱密度限制。考虑实际应用中多个 OFDM 符号周期内的资源分配优化,设  $N$  为子载波数,  $S$  为单位时间内 OFDM 符号数,  $U$  为用户数,则  $P_{u,s,n}$  为第  $u$  个用户在第  $s$  个 OFDM 符号的第  $n$  个子载波上的功率,如式(9)所示。

$$P_{u,s,n} = \min(P/N, PSD_{max} B/N) \quad (9)$$

式中:  $P$  为总发射功率;  $PSD_{max}$  为最大功率谱密度。由香农公式可知,用户  $u$  在单位资源格上加载的比特数如式(10)所示。

$$C_{u,s,n} = \left\lceil \log_2 \left( 1 + |H_{u,s,n}|^2 P_{u,s,n} / \Gamma \delta_{u,s,n}^2 \right) \right\rceil \quad (10)$$

$$\Gamma = 1/3 \left[ Q^{-1}(E/4) \right]^2 \quad (11)$$

$$Q(x) = 1/2\pi \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt \quad (12)$$

式中:  $H_{u,s,n}$ 、 $\delta_{u,s,n}$  分别为第  $u$  个用户在第  $s$  个 OFDM 符号的第  $n$  个子载波上的信道增益与噪声功率;  $\Gamma$  为满足误符号率  $E$  条件下的信噪比差值<sup>[27]</sup>。

设用户  $u$  的满足度因子  $F(u)$  为当前速率与 QoS 需求速率的比值,定义子载波分配时的公平因子  $f$  如式(13)所示。

$$\begin{cases} F(u) = R_u(t)/R_{\text{QoS}}(u) \\ f = [F_{\max}(u) - F_{\min}(u)]/F_{\max}(u) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $F_{\max}(u)$ 、 $F_{\min}(u)$ 分别为用户满足度因子的最大值和最小值; 公平因子  $f$  为描述各用户吞吐量相对于其 QoS 需求公平性的参数。为了避免同信道干扰, 每个子载波只能分配给一个用户, 物理层子载波分配算法在满足一定限制下, 以最大化系统吞吐量为目标, 其数学模型如式(14)、式(15)所示。

$$\max B/N \left[ \sum_{u=1}^U \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N \alpha_{u,s,n} C_{u,s,n} \right] / S \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \alpha_{u,s,n} \in \{0,1\}, \sum_{n=1}^N \alpha_{u,s,n} \leq 1 \\ f \leq f_{\text{limit}} \\ \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N \alpha_{u,s,n} C_{u,s,n} \leq q_u \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $B$  为总频带宽度;  $\alpha_{u,s,n}$  为子载波分配标识符,  $\alpha_{u,s,n}=1$  表示第  $s$  个 OFDM 符号的子载波  $n$  分配给了用户  $u$ ,  $\alpha_{u,s,n}=0$  则表示没有分配给用户  $u$ ;  $f_{\text{limit}}$  为子载波分配的公平性阈值, 可以保证各用户间分配资源的相对公平性, 此条件维持了各用户吞吐量相对于其 QoS 需求的公平性;  $q_u$  表示用户  $u$  缓存队列里的数据量, 此条件保证了队列已经为空的用户不会再分配到子载波, 避免了系统资源的浪费。

### 2.3 MAC 层高效用值数据包优先调度准则

根据电力线通信网络的业务层、网络层和 MAC 层信息, 构建 MAC 层数据包调度效用值模型, 牺牲调度效用值最小的非实时用户所分配的比特数, 优先调度效用值最大的用户队列数据包, 使数据包调度更符合各用户的 QoS 需求。提出高效用值数据包优先调度准则, 如式(16)所示。

$$B[u_{\max}(W)]/B[u_{\min}(W)] \geq \text{MAX}(W_U)/\text{MIN}(W_U) \quad (16)$$

式中:  $u_{\max}(W)$ 、 $u_{\min}(W)$  分别为数据包调度效用值最大的用户编号和数据包调度效用值最小的非实时用户编号;  $B[u_{\max}(W)]$ 、 $B[u_{\min}(W)]$  为其在本次调度所分配的比特数;  $W_U$  表示各用户缓冲队列首个数据包的调度效用值集合。当系统完成物理层子载波初步分配后, 需判断其分配方案是否满足 MAC 层高效用值数据包优先调度准则, 如不满足则找出调度效用值最小的非实时用户  $u_{\min}(W)$  所分配的子载波集合  $\{n_u\}$ , 分别计算  $\{n_u\}$  中的子载波对于  $u_{\min}(W)$  和  $u_{\max}(W)$  所能加载比特数的差值并排序, 优先将差值小的子载波分配给用户  $u_{\max}(W)$ , 直到满足式(16)的准则或  $u_{\min}(W)$  的子载波被分配完毕。

## 3 多跳中继 BPLC 网络的 OFDM 跨层资源分配算法

### 3.1 前提与假设

1) 资源分配前中心节点发送信息探测帧, 各中继节点和终端用户反馈响应帧, 以获得各链路信道状态信息和网络拓扑。含有数据与资源分配信息的数据帧传送到用户后, 用户对各子载波解调并结合分配信息对数据组包以得到完整数据。

2) 设数据包从发送端到接收端的时延由传输时延、传播时延和队列时延组成, 忽略中继器处理时延等其他因素。

### 3.2 业务层和网络层的信息映射

跨层优化设计建立在传统的网络分层结构之上, 通过汇总各层参数信息并进行融合, 淡化层与层之间的界限, 以利用融合的参数信息指导 OFDM 通信系统的资源分配。通过发送信息探测帧, 中心节点已知网络拓扑的结构, 在跨层资源分配之前, 首先应该提取通信网络的业务层和网络层信息。由图 1 可知, 终端节点 3、6、10、13 是传输对时延和通信速率要求较高的业务, 如语音与视频等多媒体业务的用户, 称为实时(Real-time, RT)用户; 终端节点 8、11、14、15、16 是传输对通信速率和时延要求较低业务, 如文件与信息传输等业务的用户, 称为非实时(Non-real-time, NRT)用户。由图 1 所示系统网络层的路径信息可知, 中心节点到各终端节点的通信路径如表 1 所示。

表 1 各终端用户的通信路径

Table 1 Communication path of each end user

终端用户编号	通信路径	终端用户编号	通信路径
3	1-3	13	1-5-9-13
6	1-2-6	14	1-5-9-14
8	1-4-8	15	1-2-7-12-15
10	1-5-10	16	1-2-7-12-16
11	1-5-11	—	—

由表 1 可知, 各用户通信路径的交叉节点编号为 1、2、5、9、12, 称为交叉中继节点; 不存在通信路径交叉的中继节点编号为 4、7, 称为非交叉中继节点。计算节点 4 到用户 8 传输时延、传播时延以及最大通信速率, 将此信息与用户 8 的 QoS 需求反馈至中心节点, 即完成用户 8 的网络层和业务层信息映射。设中心节点为第 1 级节点, 通信路径中每经过一段通信链路则节点级数加 1。从各用户通信路径的末端回溯, 依次计算非交叉节点到下一级节点的传输时延、传播时延以及最大通信速率, 逐级反馈至中心节点, 并通过反馈响应帧使中心节点

掌握通信网络的路径结构和各用户的 QoS 需求信息, 包含多个用户终端的节点 QoS 需求为各用户 QoS 需求的综合值。完成所有用户的网络层和业务层信息映射, 然后进行系统的跨层资源分配, BPLC 网络 OFDM 跨层资源分配原理如图 3 所示。

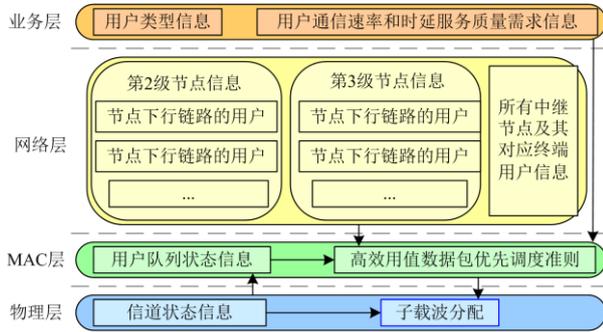


图 3 OFDM 跨层资源分配原理图

Fig. 3 Schematic diagram of OFDM cross layer resource allocation

### 3.3 多跳中继电力线通信网络的跨层资源分配算法步骤

算法步骤如下。

步骤 1: 从中心节点开始, 对第 2 级各节点进行资源分配。

步骤 2: 在物理层进行子载波分配, 各子载波按照等功率原则进行比特加载。将子载波优先分配给信道增益最高的节点, 以最大化系统吞吐量。如果节点包含的所有用户缓存队列均为空, 则不再为此节点分配子载波。

步骤 3: 判断第  $i$  个节点所分配的通信速率  $V(i)$  是否高于其下级通信链路所能提供的最大通信速率  $V_{\max}(i)$ , 若不高于  $V_{\max}(i)$ , 则进行下一步并记录其阈值。否则将此节点加载比特数最小的子载波分配给该子载波的次优节点。

步骤 4: 重复步骤 3, 直到每节点所分配的通信速率均不高于其下行通信链路所能提供的最大通信速率。

步骤 5: 计算子载波分配公平因子, 判断公平因子是否符合预设的公平性阈值。如果符合阈值则进行下一步, 否则将满足度因子最大节点中加载比特数最小的子载波分配给满足度因子最小的节点。

步骤 6: 重复步骤 5, 直至公平因子符合预设的公平性阈值。

步骤 7: 根据业务层和网络层映射的信息, 计算第 2 级各节点下行链路对应用户的数据包调度效用值, 并对各节点所包含用户的数据包调度效用值由大到小进行排序。

步骤 8: 判断当前资源分配方案是否满足式(16)

所示的高效用值数据包优先调度准则, 如不符合则用 2.3 节中方法调整子载波分配, 直到满足该准则或  $u_{\min}(W)$  的子载波被分配完毕, 然后将资源分配信息和数据分组填入数据帧发送。至此完成中心节点到第 2 级节点的资源分配过程。

步骤 9: 每个第 2 级节点对其下属的第 3 级节点, 用步骤 2—步骤 8 的方法完成资源分配。

步骤 10: 按照上述步骤, 依次完成各级交叉中继节点的资源分配, 至此完成多跳中继宽带电力线通信网络的跨层资源分配过程, MR-CLRA 算法流程如图 4 所示。

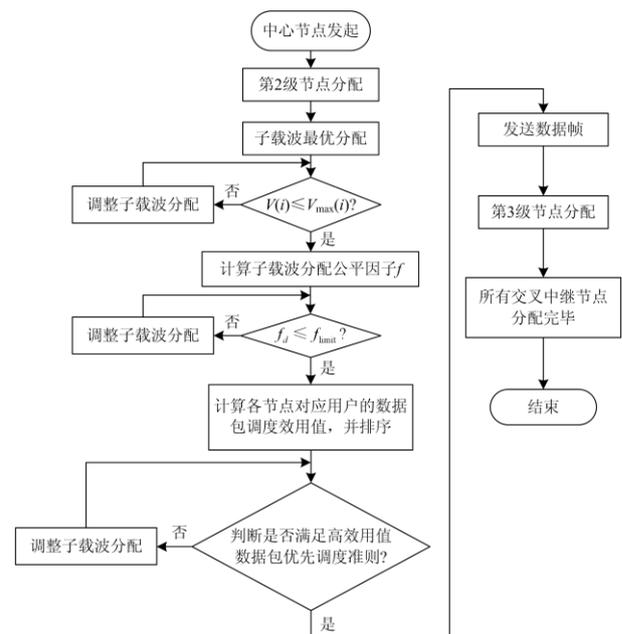


图 4 MR-CLRA 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of MR-CLRA algorithm

## 4 算法仿真与分析

### 4.1 仿真环境与参数设置

为了验证算法在电力线信道环境下的有效性, 参考文献[28]的典型电力线信道参数和式(1), 建立了所有通信链路的信道模型, 为模拟电力线信道的时变性, 设置各信道增益的变化幅度服从区间为 [0.5 dB, 1.5 dB] 的均匀分布<sup>[29]</sup>。参考文献[26]将信道噪声看作有色背景噪声, 其功率谱密度为  $-120 + 40e^{-f/0.7}$  dBm/Hz。实时用户的 QoS 速率需求为  $10 \text{ Mbit s}^{-1}$ , 最大时延为  $3 \times 10^{-2} \text{ s}$ , 非实时用户的 QoS 速率需求为  $2 \text{ Mbit s}^{-1}$ , 最大时延为  $2 \times 10^{-1} \text{ s}$ 。以图 1 所示的宽带电力线通信拓扑结构作为仿真网络, 各相邻节点之间的距离服从区间为 [85 m, 95 m] 的均匀分布。仿真软件工具是 Matlab2020, 其他参

数如表 2 所示。

选用文献[6]和文献[9]中的算法作对比, 由于对比算法均未考虑到多跳中继通信网络的路由信息, 为了便于对比分析, 在各交叉中继节点的资源分配过程中分别使用本文算法和对比算法来进行性能比较。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	取值	参数定义
$U$	9	用户数
$N$	1 024	子载波数
$P/MW$	3	总发射功率
$B/MHz$	1~30	频带范围
$PSD_{max}/(dBm/Hz)$	-55	功率谱密度上限
$S_{frame}/ms$	1	数据帧长度
$f_{limit}$	0.1	公平性阈值
$E$	$10^{-6}$	误码率
$S/\mu s$	35.32	OFDM 符号周期
$S_b/\mu s$	7	保护间隔长度

#### 4.2 各算法在中心节点对第 2 级节点的资源分配性能比较

将文献[6]、文献[9]和 MR-CLRA 中的算法分别应用于中心节点对第 2 级节点的资源分配中, 各算法吞吐量对比如图 5、表 3 所示。由图 5、表 3 可知, 各 2 级节点的吞吐量与其下行链路所包含的用户数成正比, 以保证在多跳中继通信网络中各终端用户的 QoS 需求。图 6 是各算法在第 2 级节点资源分配的时延对比, 文献[6]算法在节点 2、4、5 的时延最低, 但是在节点 3 的时延过高, 节点 3 的下行链路只包含用户 3 且为实时用户, 所以文献[6]算法不能满足其时延要求。MR-CLRA 算法在节点 2、3、4 的时延均低于文献[9], 在节点 5 的时延略高于文献[9], 显然 MR-CLRA 算法的总体时延特性优于其他对比算法。由图 5、图 6 可知, MR-CLRA 算法在第 2 级节点的资源分配性能优于文献[6]与文献[9]算法。

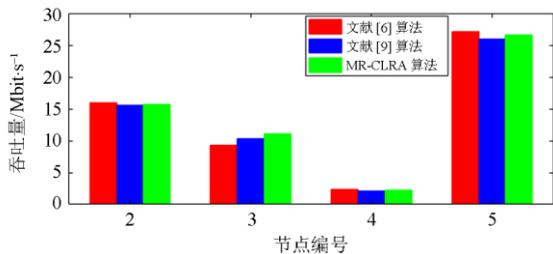


图 5 对第 2 级节点资源分配吞吐量对比  
Fig. 5 Comparison of throughput in resource allocation for level 2 nodes

表 3 各算法在第 2 级节点分配吞吐量数值对比

Table 3 Numerical comparison of throughput allocation of each algorithm for level 2 nodes

节点编号	文献[6]算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>	文献[9]算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>	MR-CLRA 算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>
2	16.000	15.537	15.791
3	9.281	10.274	11.036
4	2.400	2.081	2.258
5	27.088	25.905	26.606

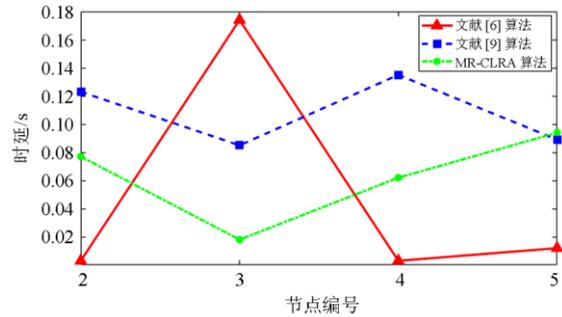


图 6 对第 2 级节点资源分配时延对比  
Fig. 6 Comparison of time delay in resource allocation for level 2 nodes

#### 4.3 各算法在多跳中继 BPLC 通信网络中的资源分配性能比较

将各算法应用于每个交叉节点的计算中, 完成多跳中继宽带电力线通信网络的资源分配, 各用户资源分配的吞吐量对比如图 7、表 4 所示。由图 7、表 4 可知, 文献[6]算法不能保证所有实时用户的通信速率需求, 虽然其非实时用户的通信速率满足服务质量需求, 且各用户间看似具有较高的公平性, 但是实质上各用户相对于其各自 QoS 速率需求的公平性较差, 导致非实时用户通信速率过高, 而部分实时用户的通信速率不足, 不能保障所有用户的有效可靠通信, 系统资源利用率较低。文献[9]算法和 MR-CLRA 算法都能保证实时用户和非实时用户

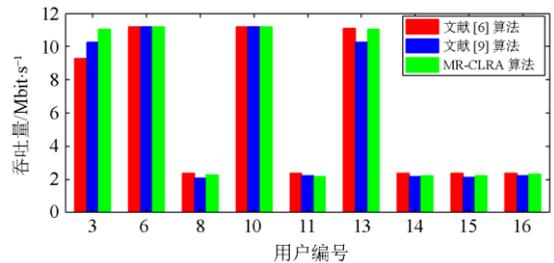


图 7 各算法资源分配的吞吐量对比  
Fig. 7 Comparison of throughput in resource allocation among algorithms

表 4 各类型用户在不同算法分配的吞吐量对比

Table 4 Throughput comparison of different types of users in different algorithms

用户编号	用户分类	文献[6]算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>	文献[9]算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>	MR-CLRA 算法 吞吐量/Mbit s <sup>-1</sup>
3	RT	9.281	10.274	11.036
6	RT	11.200	11.200	11.170
8	NRT	2.400	2.081	2.258
10	RT	11.200	11.199	11.169
11	NRT	2.400	2.253	2.181
13	RT	11.088	10.261	11.051
14	NRT	2.400	2.192	2.205
15	NRT	2.400	2.111	2.221
16	NRT	2.400	2.226	2.400
合计		54.769	53.797	55.691

的通信速率需求, MR-CLRA 算法的系统整体吞吐量较大, 仿真结果验证了 MR-CLRA 算法在各用户上分配吞吐量的结果优于文献[6]和文献[9]算法。

各算法资源分配的时延对比如图 8、表 5 所示。由图 8、表 5 可知, 所有算法都可以满足非实时用户的时延要求, 文献[6]算法不能满足用户 3 的时延需求, 文献[9]算法不能满足用户 3、13 的时延需求, 这是因为文献[6]算法和文献[9]算法在 OFDM 资源分配时, 均未将各用户时延约束因素考虑到数据包调度和子载波分配中。MR-CLRA 算法提出 MAC 层高效用值数据包优先调度准则, 综合考虑各用户的通信速率和时延需求, 根据该优先调度准则优化子载波分配, 使 MR-CLRA 算法可以满足所有用户的通信速率和时延服务质量要求。MR-CLRA 算法的总时延介于文献[6]算法与文献[9]算法之间, 虽然文献[6]算法的整体时延最小, 但是其资源分配结果并不符合用户需求, 仿真结果验证了 MR-CLRA 算法的整体时延特性优于其他对比算法。

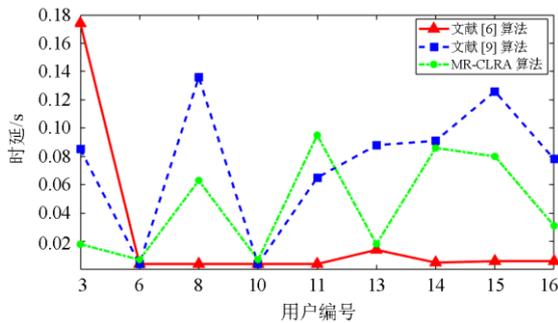


图 8 各算法资源分配的时延对比

Fig. 8 Comparison of time delay in resource allocation among algorithms

表 5 各类型用户在不同算法分配的时延对比

Table 5 Delay comparison of different types of users in different algorithms

用户编号	用户分类	文献[6]算法 时延/s	文献[9]算法 时延/s	MR-CLRA 算法时延/s
3	RT	0.174	0.085	0.018
6	RT	0.004	0.004	0.007
8	NRT	0.004	0.136	0.063
10	RT	0.004	0.004	0.007
11	NRT	0.004	0.065	0.095
13	RT	0.014	0.088	0.018
14	NRT	0.005	0.091	0.086
15	NRT	0.006	0.126	0.080
16	NRT	0.006	0.078	0.031
合计		0.221	0.677	0.405

MR-CLRA 算法与对比算法均为每个用户分配一个长度为 120 个数据包的缓冲区, 到达节点的数据包先被存放在相应的数据缓冲区中, 再根据 MAC 层调度优先级发送数据。当缓冲队列超过缓冲区最大长度时将产生丢包, 丢包率是衡量网络服务质量的重要指标之一。图 9 为各算法在各用户上平均丢包率的对比, 由图 9 可知, 文献[6]算法在用户 3 上产生的丢包率大于 5%, 文献[9]算法在用户 8、用户 15 上也产生了丢包, MR-CLRA 算法在各用户上均未产生丢包。由于文献[6]算法未考虑用户 QoS 需求, 造成资源分配不合理, 使用户 3 产生了较大的丢包率; 文献[9]算法将用户通信速率需求作为资源分配的依据, 但未将用户的通信时延需求考虑在内, 使资源分配效率较低, 部分用户因队列数据包溢出而产生丢包; MR-CLRA 算法则在综合考虑用户通信速率和时延需求的 MAC 层高效用值数据包优先调度准则的指导下进行资源分配, 各用户缓冲队列无数据包溢出, 因而没有产生丢包, 显然 MR-CLRA 算法在用户丢包率方面优于其他对比算法。

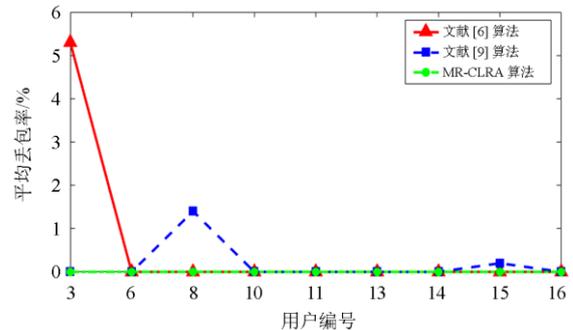


图 9 各算法在各用户上平均丢包率的对比

Fig. 9 Comparison of average packet loss rate of each algorithm on each user

除吞吐量、时延特性和丢包率以外, MR-CLRA 算法与对比算法的主要不同之处在于多跳中继通信网络中的资源分配。传统的 OFDM 资源分配算法假设中心节点与终端用户之间的通信路径没有中继器或将中继器看作是透明的, 将通信链路中各段信道视为一个等效信道。然而在实际应用时, 中继器收发数据帧所造成的时延以及各段链路信道条件和突发干扰不一致的情况不能被忽略, 需要在每个交叉中继节点分别进行 OFDM 资源分配。MR-CLRA 算法提出了多跳中继宽带电力线通信网络资源分配的解决方案, 仿真结果表明, MR-CLRA 算法能满足所有实时用户和非实时用户的通信速率与时延服务质量需求, 相比于对比算法具有更高的系统整体吞吐量和更小的时延, 有效解决了多跳中继宽带电力线通信网络的资源分配问题。

## 5 结论

1) 针对多跳中继宽带电力线通信网络特点, 提出 MAC 层数据包调度效用值模型, 将业务层和网络层信息映射到数据包调度过程中。提出物理层子载波分配模型, 在满足公平性阈值的前提下最大化系统吞吐量。

2) 提出 MAC 层高效用值数据包优先调度准则, 将所有跨层信息用于子载波分配的优化。通过调整子载波分配方案以满足该准则, 使 OFDM 资源分配更符合各用户的通信速率和时延需求。

3) 将以上模型和准则应用于 BPLC 通信网络各交叉节点的 OFDM 资源分配过程中, 提出具有多路由中继的宽带电力线通信网络跨层资源分配算法, 即 MR-CLRA 算法。仿真结果表明, 相对于对比算法, MR-CLRA 算法能够保证各用户的 QoS 需求, 具有较高的系统吞吐量和较好的时延特性。

本文提出的跨层资源分配算法为多跳中继宽带电力线通信网络的 OFDM 资源分配问题提出了一种可行的技术方案, 对其他类型通信网络的资源分配研究也具有一定借鉴意义。

## 参考文献

[1] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.  
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.

[2] CANO C, PITTOLO A, MALONE D, et al. State of the art in power line communications: from the applications to the medium[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 1935-1952.

[3] PRASAD G, LAMPE L, SHEKHAR S. In-band full duplex broadband power line communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3915-3931.

[4] CAO T, CHEN H. Low voltage power line communication system model based on orthogonal frequency division multiplexing technology[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2019, 34(9): 928-934.

[5] 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. Dynamic subcarrier allocation of PLC channel based on adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 111-116.

[6] ABD-ELNABY M, ELHADAD M, EL-RABAIE E. Capacity enhancement based on dynamically adapted PF scheduling algorithm for LTE downlink system[J]. International Arab Journal of Information Technology, 2018, 15(5): 795-801.

[7] 曹树伟, 姚强. 多用户电力线通信资源优化调度策略仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(4): 61-64.  
CAO Shuwei, YAO Qiang. Simulation of optimal scheduling strategy for multi-user power line communication resources[J]. Computer Simulation, 2019, 36(4): 61-64.

[8] 龚钢军, 陆俊, 熊琛, 等. 混合业务公平的宽带电力线正交频分复用系统跨层资源分配[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1390-1398.  
GONG Gangjun, LU Jun, XIONG Chen, et al. Cross layer resource allocation of broadband power line orthogonal frequency division multiplexing system with mixed service fairness[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1390-1398.

[9] 陆俊, 刘振宇, 徐志强, 等. 计及接入控制策略的宽带电力线 OFDM 系统跨层资源分配[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1858-1866.  
LU Jun, LIU Zhenyu, XU Zhiqiang, et al. Cross-layer resources allocation considering access control for broadband power line OFDM systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1858-1866.

[10] HE D, WEI Y, CUI S, et al. Modeling of broadband power line communication channel based on transmission line theory and radiation loss[J]. IEICE Electronics Express, 2019, 16(16).

[11] LUIS G, PABLO F, CARLOS M. Power line communication transfer function computation in real network configurations for performance analysis applications[J]. IET Communications, 2017, 11(6):

- 897-904.
- [12] MADHAV M, MAARTEN R. A channel model for power line communication using 4PSK technology for diagnosis: some lessons learned[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018: 617-634.
- [13] 杨挺, 刘佳林, 张亚健, 等. 电力线载波通信时频混合降噪方法[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3159-3166.  
YANG Ting, LIU Jialin, ZHANG Yajian, et al. Noise reduction method for LV power line carrier communication[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3159-3166.
- [14] 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 Jinran, 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.
- [15] 梁伟, 张珍珠, 夏春平, 等. 基于复杂电网的能源互联网班组融合管理的研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 58-63.  
LIANG Wei, ZHANG Zhenzhu, XIA Chunping, et al. Research on energy internet team fusion management based on complex grid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 58-63.
- [16] 李洪全, 张冀川, 丁浩, 等. 基于 IPv6 的配电物联网通信单元设计[J]. 供用电, 2020, 37(1): 21-29.  
LI Hongquan, ZHANG Jichuan, DING Hao, et al. Design of IoT communication unit based on IPv6[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(1): 21-29.
- [17] GIROTTO M, TONELLO A. EMC regulations and spectral constraints for multicarrier modulation in PLC[J]. IEEE Access, 2017: 4954-4966.
- [18] MILIOUDIS A, ANDREOU G, LABRIDIS D. Optimum transmitted power spectral distribution for broadband power line communication systems considering electromagnetic emissions[J]. Electric Power Systems Research, 2016: 958-964.
- [19] BENDAKIR A, BAYADI A, DIB D, et al. Analysis of electromagnetic field emitted by power line currents[J]. International Journal of Intelligent Engineering Informatics, 2016, 4(2): 188-203.
- [20] NOORI M, LAMPE L. Multi-way relaying for cooperative indoor power line communications[J]. IET Communications, 2016, 10: 72-80.
- [21] NIKFAR B, VINCK A. Relay selection in cooperative power line communication: a multi-armed bandit approach[J]. Journal of Communications and Networks, 2017, 19(1): 1-9.
- [22] MAURO B, SIMONE G, LUTZ L. Geo-routing algorithms and protocols for power line communications in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1472-1481.
- [23] ZHANG L, LIU X, PANG J, et al. Reliability and survivability analysis of artificial cobweb network model used in the low-voltage power-line communication system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 1980-1988.
- [24] 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.
- [25] ZIMMERMANN M, DOSTERT K. A multipath model for the powerline channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [26] 李黄强. 宽带电力线 OFDM 通信系统资源分配研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.  
LI Huangqiang. Research on dynamic resource allocation in broadband powerline OFDM communication system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.
- [27] CIOFFI J, DUDEVOIR G, EYUBOGLU M, et al. MMSE decision-feedback equalizers and coding II: coding results[J]. IEEE Transactions on Communications, 1995, 43(10): 2595-2604.
- [28] FERREIRA H, LAMPE L, NEWBURY J, et al. Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines[M]. New York: John Wiley and Sons Publication, 2010.
- [29] 刘海涛, 张保会, 谭伦农. 低压电网的窄带衰落特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(4): 411-414.  
LIU Haitao, ZHANG Baohui, TAN Lunnong. Study on narrowband fading characteristics of low voltage power grid[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(4): 411-414.

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-27

作者简介:

史建超(1989—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为智能电网通信技术; E-mail: sjcncpu@126.com

谢志远(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力线通信及智能信息传感技术; E-mail: zhiyuanxie@ncepu.edu.cn

胡正伟(1978—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力线通信技术。E-mail: hzwwizard@hotmail.com

(编辑 许威)