

宽带电力线载波通信物理层资源分配新算法

王清^{1,2}, 荆臻^{1,2}, 李琮琮^{1,2}, 朱红霞^{1,2}, 代燕杰^{1,2}

(1. 国网山东省电力公司 营销服务中心(计量中心) 济南 250000;
2. 国网山东省电力公司 电力科学研究院 济南 250000)

摘要: 宽带电力线载波基于正交频分复用技术可实现电力串行通信数据的并行传输,增强了电力通信系统的实时性与高效性。针对宽带电力线载波通信资源分配问题,文中提出了一种低复杂度的物理层资源分配算法,首先基于等功率分配方式确定各用户为满足其最低速率需求所需的子载波集合,将多用户资源分配问题降维成单用户资源分配问题,之后对各用户所分配的子载波集进行功率优化,实现系统吞吐量的进一步提升。实验表明所提算法在满足更多用户并发业务的最低传输速率需求的同时,有效提升了网络吞吐量。

关键词: 物理层; 资源分配; 功率优化; OFDM

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2021.07.017

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-4390(2021)07-0124-06

A novel algorithm of physical layer resource allocation for broadband power line carrier communication

Wang Qing^{1,2}, Jing Zhen^{1,2}, Li Congcong^{1,2}, Zhu Hongxia^{1,2}, Dai Yanjie^{1,2}

(1. Marketing Service Center (Metering Center), State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250000, China.
2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250000, China)

Abstract: Based on orthogonal frequency division multiplexing technology, broadband power line carrier can realize the parallel transmission of power serial communication data, which enhances the real-time and efficiency of power communication system. Aiming at the problem of broadband power line carrier communication resource allocation, this paper proposes a low-complexity physical layer resource allocation algorithm. Firstly, based on the equal power allocation method, the set of subcarriers required by each user to meet their minimum rate requirements is determined, and the multi-user resource allocation problem is reduced to a single-user resource allocation problem, and then, the power of the sub-carrier set allocated by each user is optimized to further improve the system throughput. Experiments show that the algorithm proposed in this paper effectively improves the network throughput while meeting the minimum transmission rate requirements of concurrent services for more users.

Keywords: physical layer, resource allocation, power optimization, OFDM

0 引言

为实现电力系统各环节的万物互联,实现电网的全面态势感知,需要以坚强可靠的电力物联和通信技术作为支撑^[1],依托云计算、智能物联、5G 通信等技术,构建人机交互、信息高效处理、应用便捷灵活特征

的智慧服务系统。作为电力物联网核心技术之一的先进通信技术是保证电力系统各环节各设备能够全面感知的前提^[2],然而随着大量智能传感设备的接入,系统中无疑会出现各类具有不同通信需求的业务,同时必然会引起数据量爆发式增长,这就对现有的通信方式提出了严峻挑战^[3]。因此如何保证各类数据能够快速准确的传输,避免网络出现拥塞影响电力系统对设备的实时控制。

电力线载波通信(Power Line Communication, PLC)

基金项目: 山东省技术创新项目(201941001013); 国网科技项目(5600201955457A0000); 国网山东省电力公司科技项目(520626200020)

将数据流于电力线路中与能量流并行传输,与无线通信相比具有不受天气遮蔽物的影响,天然具有电气设备互联、建设成本低的特点,是电力物联网信息交互的最有效通信方式之一^[4-6]。电力线载波通信技术历经传统窄带电力线载波通信(Narrow Power Line Communication, NPLC)逐渐发展成如今宽带电力线载波通信(High Power Line Communication, HPLC),从带宽容量、传输速率和稳定性方面都有了极大提升^[7]。HPLC利用正交频分复用技术(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术将通信速率由原来的 kbps 提高到 Mbps^[8],在电力物联网中具有广泛的应用前景,例如智能电能表集抄技术^[9]、电气设备物联技术等。然而随着终端设备通信业务的多样性以及智能电网对末端设备通信需求的不断增长,传统 OFDM 资源分配算法已然难以满足信息传输和保证多用户服务质量的需求,为此对资源按需分配技术开展相关研究,将提升电力并发多业务的服务质量水平。

现阶段部分学者对电力线载波通信资源分配问题开展了初步研究,其中文献[10]采用等功率分配方式为电力线载波信道中的各子载波加载功率,为各类用户调配信道时以最大化公平偏离度为标准,并通过微调此偏离度维持载波系统可靠性,但该算法没有考虑极端场景下对任务完成时间敏感的用户的影响。文献[11]利用功率注水最大吞吐量算法求出各用户的功率注水线后,并在各用户所用子载波上加载相应功率,但是当系统内的用户数量较多时,算法的计算量较大,导致不能及时求出最优分配结果。文献[12]提出了一种基于差额分配原则的低复杂度算法,其在为非实时用户分配资源时基于比例公平原则,并通过对比特进行逐位削减以满足系统功率限制,但是在系统容量不足的情况下非实时用户的服务质量难以得到保证。文献[13]基于信噪比最大的原则为用户分配子载波,然后在满足用户与未满足用户之间交换子载波,最后基于功率增量最小原则交换子载波之间的比特,进而实现各用户的资源配置过程。

针对上述宽带电力线载波通信资源分配算法存在的问题,文中提出了一种能够满足系统内各用户服务质量需求的物理层资源分配新方法,首先基于等功率分配方式确定各用户为满足其最低速率需求所需的子载波集合,将多用户资源分配问题降维成单用户最优功率分配问题,之后对各用户所分配的子载波集进行功率优化,实现系统吞吐量的进一步提升。

1 电力线载波通信问题描述

电力线载波通信网络拓扑结构如图 1 所示,电力线信道是一个开放共享的信道^[14],在中低压三相供电系统中,A、B、C 三相各相有独立的 PLC 网关,而各 PLC 设备需要在共享的一相电力信道上竞争本相资源。因此,多用户动态资源分配问题的实质就是根据电力线信道的状态信息,在每个 OFDM 符号内为实时(Real-Time, RT)用户和非实时(None Real-Time, NRT)用户分配不同的子载波,并在相应的子载波上根据信道增益的大小自适应选择不同的调制方式,进而根据香农公式加载相应比特。

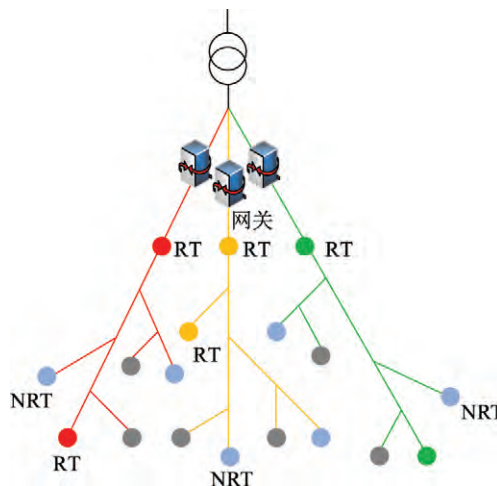


图 1 网络拓扑结构

Fig. 1 Network topology

由于网络内各个用户所在位置、连接的负载阻抗以及传输距离的不同,不同子载波对系统内的各个用户表现出不同的信道衰减情况^[15],因此在为用户分配子载波时,应充分考虑不同子载波之间的信道差异性,充分发挥多用户的分集增益。并且由于 OFDM 技术的使用,使系统内的各个子载波能够独立进行调制与解调,其中宽带电力线载波通信 OFDM 技术包含了 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、64QAM、128QAM 等多种调制编码方式^[16],系统根据子载波信道质量的大小选择相应的调制方式。

宽带电力线载波通信多用户动态资源分配不仅要满足各类用户的服务质量速率需求,同时还要考虑不同用户之间的公平性^[17],均衡信道质量较好与较差的用户资源占用情况,以满足整体服务质量水平。

2 电力线载波通信资源分配模型

假设宽带电力线载波通信系统中有 N 个子载波 h

个 RT 用户 l 个 NRT 用户 (RT 用户集合为 Ω_h , NRT 用户集合为 Ω_l)。多用户宽带电力线载波通信系统在进行资源分配时,考虑到 RT 用户对时延更敏感,有明确且较高的要求^[18],系统首先将子载波分配给 RT 用户,满足 RT 用户的速率要求 R_{kRT}^{QoS} 。在为 RT 用户分配资源满足其服务质量速率要求时,应尽量减少 RT 用户的资源占用率,以便保留充足的资源满足 NRT 用户的服务质量速率要求 R_{kNRT}^{QoS} 。在满足全部用户的服务质量速率要求后,若系统还有剩余资源,则继续将剩余资源全部分配给用户,以提高系统的整体吞吐量^[19]。系统在为各用户分配子载波时,并不需要保证各用户在获得子载波资源时的公平性,而是在系统容量一定时保证系统内的多用户并发混合业务均能够满足其传输服务质量速率需求的公平性。通过上述分配思想,宽带电力线载波通信动态资源分配数学模型如下。

$$\begin{cases} \max & \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K C_{n i k} R_{n i k} \\ \text{s. t.} & C_1: C_{n i k} \in \{0, 1\} \quad \forall n, i, k \\ & C_2: \sum_{k=1}^K C_{n i k} \leq 1 \quad \forall n, i \\ & C_3: \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K C_{n i k} P_{n i k} \leq P_{\text{total}} \quad \forall i \\ & C_4: P_{n i k} \leq P_{\text{max}} \quad \forall n, i, k \\ & C_5: \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{n i k} R_{n i k} \geq R_{kRT}^{QoS} \quad \forall k \in \Omega_h \\ & C_6: \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I C_{n i k} R_{n i k} \geq R_{kNRT}^{QoS} \quad \forall k \in \Omega_l \end{cases} \quad (1)$$

式中 $C_{n i k}$ 为子载波分配标志位, $R_{n i k}$ 为子载波加载比特; P_{total} 为系统上限发射功率; 为避免子载波上加载的功率过高,对该频段内无线通信方式造成干扰, P_{max} 为功率谱限制下的每个子载波发射功率上限; R_{kRT}^{QoS} 为 RT 用户 k 的服务质量速率要求; R_{kNRT}^{QoS} 为 NRT 用户 k 的服务质量速率要求。

根据香农公式,在第 i 个 OFDM 符号分配给用户 k 的子载波 n 上加载的比特数 $R_{n i k}$ 为:

$$R_{n i k} = \log_2 \left(1 + \frac{|H_{n i k}|^2 P_{n i k}}{\sigma_{n i k}^2 \Gamma} \right) \quad (2)$$

在该数学模型中目标函数为实现系统吞吐量的最大化。其约束条件说明如下为: C_1 为子载波分配标志位; C_2 为子载波 n 与用户之间一对一的限制; C_3 为总发射功率限制; C_4 为单载波最大发射功率限制; C_5 为 RT 用户服务质量速率需求限制; C_6 为 NRT 用户服务质量

速率需求限制。

3 物理层资源分配算法

上述宽带电力线载波通信动态资源分配数学模型为复杂的多约束整数规划问题,直接对其进行求解较为困难。文中为降低电力线载波通信资源分配问题求解的复杂度,在此采用分步法为各用户分配子载波以及系统功率。算法首先为调度用户划分子载波集以保证用户满足其服务质量需求,通过将频段内 N 个子载波等功率分配,各频段载波分配量为^[20]:

$$p_n = \frac{P_{\text{total}}}{N} \quad (3)$$

式中 P_{total} 为系统总发射功率; p_n 为子载波 n 上加载的功率。

物理层计算在子载波等功率模式下为满足用户服务质量速率要求所需的子载波数量为 n_k ,则分配给用户 k 的系统功率 $p_k = n_k p_n$,其中,

$$\sum_{k=1}^K p_k \leq P_{\text{total}} \quad (4)$$

在确定各用户为满足其业务服务质量速率要求所用子载波后,进一步确定子载波集合与各个用户之间的服务质量速率需求,采用拉格朗日乘法对子载波以最大化用户吞吐量为目标进行分配^[21],如公式(5)所示。

$$\begin{cases} \max & \sum_{n=1}^{n_k} \log_2 \left(1 + \frac{|H_{n k}|^2 P_{n k}}{\sigma_{n k}^2 \Gamma} \right) \\ \text{s. t.} & C_1: \sum_{n=1}^{n_k} p_{n k} \leq P_k \\ & C_2: p_{n k} \leq P_{\text{max}} \quad \forall n \\ & C_3: \sum_{n=1}^{n_k} \log_2 \left(1 + \frac{|H_{n k}|^2 P_{n k}}{\sigma_{n k}^2 \Gamma} \right) \geq R_k^{QoS} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $H_{n k}$ 为用户 k 在子载波 n 上的信道增益, $p_{n k}$ 为用户 k 在子载波 n 上分配的功率, $\sigma_{n k}^2$ 为用户 k 在子载波 n 上的信道噪声, Γ 为与调制方式有关的信噪比间隔, P_{max} 为功率谱限制下的每个子载波发射功率上限。

上述问题的拉格朗日函数为:

$$\begin{aligned} L(\lambda_k, \mu_k, \nu_k) &= \sum_{n=1}^{n_k} \log \left(1 + \frac{|H_{n k}|^2 P_{n k}}{\sigma_{n k}^2 \Gamma} \right) + \lambda_k (P_k - \sum_{n=1}^{n_k} p_{n k}) \\ &+ \mu_k (P_{\text{max}} - p_{n k}) + \nu_k \left(\sum_{n=1}^{n_k} \log \left(1 + \frac{|H_{n k}|^2 P_{n k}}{\sigma_{n k}^2 \Gamma} \right) - R_k^{QoS} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 λ_k, μ_k, ν_k 分别是对应 C_1, C_2, C_3 不等式约束

的拉格朗日乘子。

于是可以将问题(5)转化为拉格朗日对偶问题,其表达式为:

$$\begin{cases} \min & L(\lambda_k, \mu_k, \nu_k) \\ \text{s. t.} & \lambda_k \geq 0, \mu_k \geq 0, \nu_k \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

拉格朗日乘子的更新方式如下:

$$\lambda_k^{(m+1)} = \left(\lambda_k^{(m)} - \rho \frac{\partial L}{\partial (\lambda_k^{(m)})} \right)^+ \quad (8)$$

$$\mu_k^{(m+1)} = \left(\mu_k^{(m)} - \rho \frac{\partial L}{\partial (\mu_k^{(m)})} \right)^+ \quad (9)$$

$$\nu_k^{(m+1)} = \left(\nu_k^{(m)} - \rho \frac{\partial L}{\partial (\nu_k^{(m)})} \right)^+ \quad (10)$$

其中 ρ 为迭代步长 $0 < \rho < 1$ 。

在第 m 次迭代时,函数 $L(\lambda_k, \mu_k, \nu_k)$ 关于拉格朗日系数的梯度为:

$$\frac{\partial L}{\partial (\lambda_k^{(m)})} = p_k - \sum_{n=1}^{n_k} (P_{n,ik}^*)^{(m)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial (\mu_k^{(m)})} = P_{\max} - P_{n,ik}^* \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial (\nu_k^{(m)})} = \sum_{n=1}^{n_k} \log_2 \left(1 + \frac{|H_{n,ik}|^2 P_{n,ik}^*}{\sigma_{n,ik}^2 \Gamma} \right) - v_{kmin}(i) \quad (13)$$

在每次迭代中,计算当前搜索的最优值,并进行实时更新:

当满足 $|L_{best}^{(m)} - L_{best}^{(m-1)}| \leq \varepsilon$ 时,算法终止迭代,其中 ε 为允许误差,此时功率最优解为:

$$P_{n,ik}^* = \left(\frac{1 + \nu_k^*}{(\lambda_k^* + \mu_k^*) \ln 2} - \frac{\sigma_{n,ik}^2 \Gamma}{|H_{n,ik}|^2} \right)^+ \quad (14)$$

针对上述分析,给出多用户混合业务下的宽带电力线载波通信物理层资源分配算法流程图如图 2 所示。

由于宽带电力线载波通信系统内接有不同类型的用户,不同用户具有不同的业务优先级,系统应优先保证高优先级用户能够获得充足的系统资源满足其 QoS 速率需求,并按照业务优先级的大小依次为用户分配系统资源。下面结合图 2 算法流程图,给出其具体资源分配步骤如下:

由于宽带电力线载波通信系统内接有不同类型的用户,不同用户具有不同的业务优先级,系统应优先保证高优先级用户能够获得充足的系统资源满足其服务质量速率需求,并按照业务优先级的大小依次为用户分配系统资源。下面结合图 2 算法流程图,给出其具体资源分配步骤:

Step1: 初始化 $i=0$, RT 用户集为 Ω_h , NRT 用户集为 Ω_l , 则所有用户集 $\Omega_k = \Omega_h \cup \Omega_l$, 此外可用子载波集合 $S = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, 用户瞬时速率 $R_k(0) = 0$ 。

Step2: 于集合 S 中,按照业务优先级为集合 Ω_k 中用户 k^* 分配子载波,并筛选出信道质量最好的子载波 $n^* = \text{argmax}(SNR_{n,ik^*})$, 并更新集合 $S = S - \{n^*\}$ 。

Step3: 将满足服务质量 $R_{k^*}(i) \geq R$ 的用户 k^* 从集合 Ω_k 中剔除,即 $\Omega_k = \Omega_k - \{k^*\}$, 转 Step4。如若不存在这样的用户,则转 Step2。

Step4: 若集合 S 与集合 Ω_k 均不为空集,则转 Step2, 若集合 Ω_k 为空集但集合 S 不为空集,则重置 $\Omega_k = \Omega_h \cup \Omega_l$, 直至集合 S 为空。

Step5: 更新单用户 k^* 用户实际获得的速率 $R_{k^*}(i)$ 对内的子载波集合进行功率优化,并更,结束本次物理层资源配置,令 $i = i + 1$ 进入 Step2。

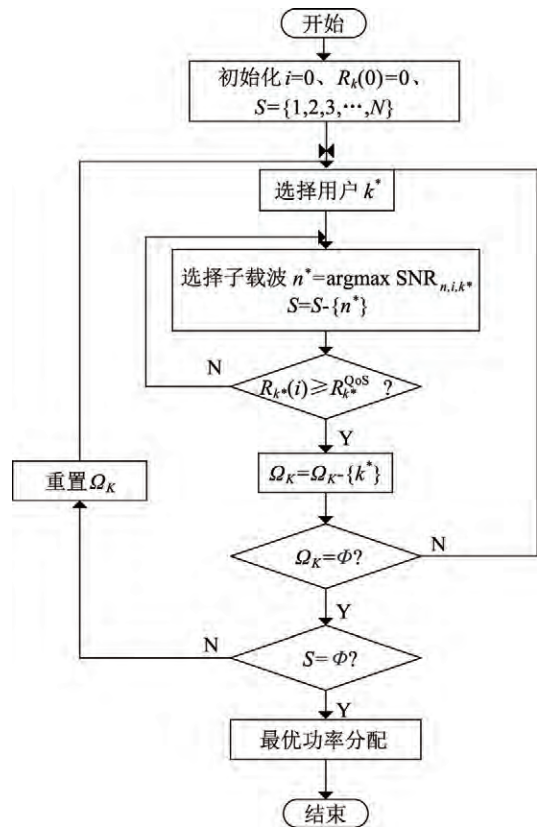


图 2 宽带电力线载波通信物理层资源分配算法流程图

Fig. 2 Flow chart of physical layer resource allocation algorithm for broadband power line communication

4 算法性能分析

为验证文中所提方法在满足多用户服务质量速率需求上具有的优越性,此处以接入宽带电力线载波通

信系统 4 用户为例展开实验分析,参量说明如表 1 所示。

表 1 系统参数说明

Tab. 1 Description of system parameters

参数名称	参数值
子载波数目	131
频段范围	2.441 MHz - 5.615 MHz
功率谱限制	-45 dBm/Hz
FFT/IFFT 长度	40.96 μ s
保护间隔长度	18.32 μ s
系统发射功率	50 MW
RT 速率要求	200 kbp/s
NRT 速率要求	150 kbp/s

系统内包含了 2 个 RT 用户和 2 个 NRT 用户,其中信道质量由高到低分别为 $RT_1 > RT_2, NRT_1 > NRT_2$ 。为了验证所提算法的性能,分别在系统容量充足以及系统容量不足两种环境下将所提算法与文献 [10] 中 Gong 算法和文献 [11] 中最大吞吐量算法对 RT 用户、NRT 用户的吞吐量进行对比。

图 3 为系统容量充足时各算法下不同用户的吞吐量对比,从图中可以看出最大吞吐量算法为了追求系统整体吞吐量的最大化,将大量系统资源分配给信道质量较好的用户 $RT_1、NRT_1$,该类用户获得了较多的系统资源因而其速率远高于服务质量速率需求,而信道质量较差的用户 $RT_2、NRT_2$ 因获得的资源不足导致速率低于服务质量要求的最低速率,系统内用户之间的公平性较差。Gong 算法在为各用户分配系统资源时考虑了不同业务的服务质量需求,因此在系统容量充足时 4 个用户均能满足要求,而整体吞吐量较低,其原因在于此算法采用累计公平偏离度最大的原则。而所提算法通过基于等功率分配方式为系统内各子载波加载功率,使系统内的各用户满足其最低速率需求,当系统内存在剩余资源情况下基于信噪比最大的原则继续为用户分配剩余资源,之后采用拉格朗日乘子法对各用户内的子载波进行最优功率分配,大大提高了各用户的实际吞吐量。对于信道质量较差的用户 $RT_2、NRT_2$ 所提算法比最大吞吐量算法用户吞吐量分别提高了 16.94%、14.18%,比 Gong 算法用户吞吐量分别提高了 6.47%、4.97%。

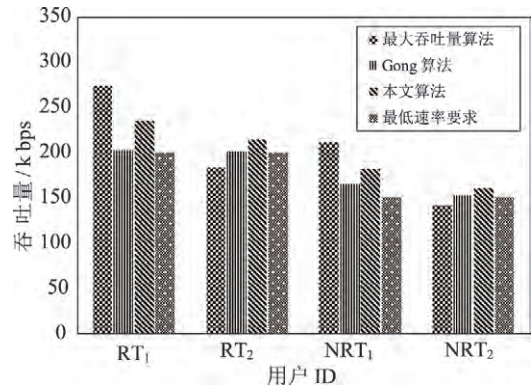


图 3 容量充足时用户吞吐量

Fig. 3 User throughput with sufficient capacity

图 4 为系统容量不足时各算法下不同用户的吞吐量,其中最大吞吐量算法在系统容量不足时依然将大量资源分配给信道质量较好的用户 $RT_1、NRT_1$,其速率远高于最低速率需求,然而信道质量较差的用户 $RT_2、NRT_2$ 因获得的资源不足,速率低于服务质量要求的最低速率。Gong 算法采用等功率分配方式并基于累计公平偏离度最大的原则首先为 RT 用户分配系统资源,之后再为 NRT 用户分配剩余资源,在系统容量不足的环境下,虽然该算法满足了 RT 用户的服务质量速率要求,但 NRT 用户获得的速率均低于服务质量速率需求。而所提算法在为各用户分配系统资源时考虑了各用户的服务质量速率要求,通过对各用户子载波进行功率优化,有效提高了各用户的实际吞吐量,在系统容量不足时仅有用户 NRT_2 未满足服务质量速率要求,因此所提算法将宽带电力线载波通信的传输性能进行了有效提升,可以满足系统内更多用户的服务质量需求。

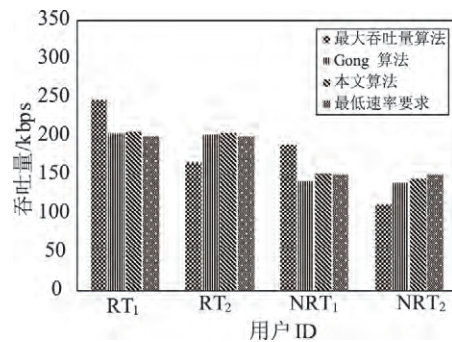


图 4 容量不足时用户吞吐量

Fig. 4 User throughput with insufficient capacity

5 结束语

针对宽带电力线载波通信物理层资源分配问题,文中提出了一种低复杂度的物理层资源分配算法,算法首先基于等功率分配方式确定各用户为满足其服务

质量速率需求所需的子载波集合,将多用户资源分配问题降维成单用户最优功率分配问题,之后基于对各个子载波集信道进行了优化调配,进一步提升了载波信道吞吐量。通过系统容量充足以及系统容量不足两种仿真环境,验证了所提算法不仅可以提高系统的吞吐量,而且能够满足宽带电力线载波通信系统内更多用户的服务质量需求,有效提高了宽带电力线载波通信传输性能。

参 考 文 献

[1] 杨挺,赵黎媛,王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化,2019,43(1): 2-14.
Yang Ting, Zhao Liyuan, Wang Chengshan. Review of application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14.

[2] 胡永红,张超,文一帆,等. 智能电网终端融合通信接入网切换策略[J]. 电测与仪表,2019,56(23): 90-96.
Hu Yonghong, Zhang Chao, Wen Yifan, et al. Switching strategy of smart grid terminal fusion communication access network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 90-96.

[3] 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.

[4] 金鑫,肖勇,曾勇刚,等. 低压电力线宽带载波通信信道建模及误差补偿[J]. 中国电机工程学报,2020,40(9): 2800-2809.

[5] 谢志远,陈文,曹旺斌,等. 中压电力线通信自适应 OFDM 系统背景噪声抑制技术研究[J]. 电测与仪表,2019,56(24): 21-25.

[6] 王新刚,赵航. 计及通信资源优化的电力线载波通信路由算法研究[J]. 电测与仪表,2019,56(22): 79-83.

[7] Nassar M, Lin J, Mortazavi Y, et al. Local utility powerline communications in the 3-500 khz band: channel impairments, noise, and standards[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(5): 116-127.

[8] 戚佳金,陈雪萍,刘晓胜. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术,2010,34(5): 161-172.

[9] 王鸿笙,唐如意,吴一敌,等. 基于 HPLC 的智能抄表技术在客户侧泛在电力物联网中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(3): 92-98.

[10] 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.

[11] Subramanian V G, Berry R A, Agrawal R. Joint Scheduling and Resource Allocation in CDMA Systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2416-2432.

[12] 李黄强,孙云莲. 混合业务下的电力线通信资源优化分配[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10): 92-97.
Li Huangqiang, Sun Yunlian. Resource Allocation of the Power Line Communication System for Mixed Traffics[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(10): 92-97.

[13] 徐志强,瞿明岳,赵宇明,等. 多用户电力线通信自适应 OFDM 系统中的资源分配与交换优化[J]. 电网技术,2009,33(6): 90-95.

[14] 李松浓,胡晓锐,郑可,等. 低压电力线载波通信信道衰减特性测量与分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(4): 99-106.

[15] Chaudhuri A, Bhatnagar M R. Optimised resource allocation under impulsive noise in power line communications[J]. Communications Lett, 2014, 8(7): 1104-1108.

[16] 黄宇栋. 基于 OFDM 的低压电力线自适应资源分配算法研究[D]. 长沙: 湖南大学,2016.

[17] 胡晓宇. 电力线通信若干关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学,2019.

[18] 相国强. OFDM 系统中自适应资源分配算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学,2014.

[19] Gassara H, Rouissi F, Ghazel A. Top-down random channel generator for the narrowband power line communication[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 89: 146-152.

[20] 袁建国,南蜀崇,张芳,等. 基于人工蜂群算法的多用户 OFDM 自适应资源分配方案[J]. 吉林大学学报: 工学版,2019,49(2): 624-630.

[21] 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, 82.

作者简介:



王清(1984—)男,通信作者,博士,主要从事通信与信息系统、电力物联网、能源计量技术研究。
Email: 1799726266@qq.com

荆臻(1981—)女,硕士,主要从事电力物联网、电能计量技术研究。
Email: 32194587@qq.com

李琮琮(1985—)女,硕士,主要从事电力通信、综合能源系统研究。
Email: 392981749@qq.com

朱红霞(1989—)女,硕士,主要从事电测量、综合能源系统研究。
Email: 826359738@qq.com

代燕杰(1983—)女,硕士,教授级高级工程师,主要从事电能计量、电力市场现货交易研究。Email: 85641088@qq.com

收稿日期:2021-01-04;修回日期:2021-03-12
(王家隆 编发)