

基于NOMA技术的PLC-VLC用户配对和子载波分配方法

刘焕淋¹, 黄美娜¹, 陈 勇², 杨 健¹, 黄冰川¹, 张 彤¹

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

摘 要: 为了提高室内电力线通信和可见光通信(PLC-VLC)系统的吞吐量和用户体验的公平性, 该文提出一种改进遗传算法优化用户配对联合子载波分配(IGA-JUPSA)方法. 在IGA-JUPSA的用户配对阶段, 设计了最优的非正交多址技术(NOMA)用户配对方法, 提高PLC-VLC系统的吞吐量; 在IGA-JUPSA的子载波分配阶段, 设计NOMA与正交多址技术结合的子载波分配策略, 设计改进的遗传算法优化不同NOMA组的子载波分配, 提高系统的吞吐量和用户体验的公平性. 仿真结果表明, 所提的用户配对和子载波联合方法可以提高PLC-VLC系统的吞吐量和用户体验的公平性.

关键词: PLC-VLC系统; NOMA; 子载波分配; 改进遗传算法; 系统吞吐量

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)10-1952-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20210176

User Pairing and Subcarrier Allocation for PLC-VLC Based on NOMA Technology

LIU Huan-lin¹, HUANG Mei-na¹, CHEN Yong², YANG Jian¹, HUANG Bing-chuan¹, ZHANG Tong¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: For improving the throughput and the fairness of user experience of indoor power line communications-visible light communications (PLC-VLC) system, an improved genetic algorithm based joint user pairing and subcarrier allocation (IGA-JUPSA) method is proposed in the paper. In the user pairing stage, a method of optimal non-orthogonal multiple access (NOMA) user pairing is designed to improve the throughput of PLC-VLC system. During the process of subcarrier allocation, the subcarrier allocation scheme combined NOMA with orthogonal multiple access (OMA) is proposed, and the improved genetic algorithm is used to optimize the subcarrier allocation for different NOMA groups for improving the system throughput and user fairness. Simulation results show that the proposed IGA-JUPSA can improve the throughput of PLC-VLC cascaded system and the fairness experience of users.

Key words: PLC-VLC system; NOMA; sub-carrier allocation; improved genetic algorithm; system throughput

1 引言

随着万物互联网、云计算和智能应用的发展,在高铁、动车、医院、船舶、会场和办公场所等人员密集的室内场合,网络边缘的大量通信数据需要接入网络,使频谱有限的射频无线接入面临巨大的挑战.可见光通信(Visible Light Communications, VLC)因其发射功率高、无电磁干扰、绿色安全、无需频谱认证等优点,成为解决无线接入的频谱拥挤和带宽不足问题中极具潜力的

高速接入方法.

VLC利用发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为接入点(Access Point, AP)实现宽带室内数据的接入^[1].然而,可见光通信的设备工作需要使用电源,室内的可见光也不能直接作为信息源,需要接入骨干网络才能避免成为信息孤岛.相较于以太网,电力线通信(Power Line Communication, PLC)可充分利用室内照明LED现有基础设施,且PLC在室内广泛布局和连接着

每个发光二极管 LED^[2],因此,越来越多研究人员开始务实地尝试将 PLC 与 VLC 级联,解决室内 VLC“信息孤岛”、数据接入速率低和带宽资源紧缺的问题,实现“有电就有光,有光就可以网络通信”的梦想. PLC 通信具有成熟的编码调制技术^[3]、噪声消减策略^[4]和信道评估方式^[5],为 PLC-VLC 系统提供了良好的技术条件.

2003 年,日本 KEIO 大学的 Nakagawa 等人提出使用 PLC 作为 VLC 的传输干线,解决可见光通信的室内布线问题^[6]. 国内研究 PLC-VLC 技术时间稍微晚一些,在文献[7]中,作者研究了 PLC-VLC 技术的车厢内视频播放的支持方法. 文献[2]作者阐述了 PLC-VLC 系统在 VLC 下行链路中未来可进行研究的方向,指出 PLC-VLC 系统中可使用的包括多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)、中继和协作通信技术在内的多种增强系统性能的技术.

但是,目前商用的 LED 只能提供有限的 VLC 调制带宽,且多个 LED 的 AP 重叠覆盖的干扰管理降低了频谱利用率,为了提高 VLC 频谱资源利用率,研究者提出了多种 VLC 的正交多址接入(Orthogonal Multiple Access, OMA)技术方法. Ndjiongue 等人在 PLC 信道上使用与正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)相结合的正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK),在 VLC 信道上使用色移键控(Color Shift Keying, CSK)进一步提高系统容量^[8]. 清华大学宋健教授团队对 PLC-VLC 融合系统信道进行分析,利用 PLC 信道、VLC 信道和 LED 等效信道的串联形式建立了融合 PLC-VLC 系统的信道分析模型^[9]. 进一步地,2017 年,陈梦迟等人研究了基于 OFDM 调制的 PLC-VLC 通信系统模型^[10]. 针对 PLC-VLC 信道特性,在文献[11]中,Ma 等人针对房间内照明设备大量重叠会产生干扰的问题,提出了通过 PLC 协调多个 VLC,设计了干扰避免的频谱复用方法.

相比 OMA 技术,非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)技术使 PLC-VLC 系统的每个子载波可以同时分配给多个用户使用,可以进一步增加 PLC-VLC 系统的容量^[12]. 在文献[13]中,丁治国等人同时考虑了功率、子信道分配和用户 NOMA 配对问题以使总系统吞吐量最大化,提出最优联合功率和子载波分配策略,为了降低计算复杂度,作者又提出了一种次优功率分配算法. 不同的 NOMA 配对方法对 VLC 系统的性能有明显的影响,文献[14]研究了总功率和比例速率约束下的一种最大化系统总吞吐量的功率分配方法,考虑到计算最佳解的复杂度较高,作者针对两用户 NOMA 配对方法,提出了一种低复杂度次优解决方法,并进而提出一种多用户 NOMA 配对方法以及功率分配方法. 为了降低算法复杂度,文献[15]研究了一种根据

信道增益排序的用户随机 NOMA 配对和子载波分配(Random User Pairing and Subcarrier Allocation, RUPSA)方法,采用信道增益比的功率分配方法,相比固定功率分配方法,RUPSA 能获得较高的平均用户速率和系统吞吐量. 文献[16]提出一种根据用户 VLC 信道增益的用户奇偶分组的 NOMA 用户配对和发端部分传输功率分配(User Pairing with Fractional Transmit Power Allocation, UP-FTPA)方法,相比 OMA 系统,UP-FTPA 可以显著地提高 VLC 系统的吞吐量,但是,该方法存在信道增益差别不大的中间用户分在同一 NOMA 组的风险,使 NOMA 解调困难.

为了进一步提高 PLC-VLC 系统的频谱资源利用率、系统吞吐量和用户公平性,本文设计了一种改进遗传算法优化 NOMA 用户配对联合子载波分配(Improved Genetic Algorithm-based Joint User Pairing and Subcarrier Allocation, IGA-JUPSA)方法.

2 基于 NOMA 的 PLC-VLC 系统模型

图 1 为基于 NOMA 的 PLC-VLC 系统模型^[16-18],多个用户通过 NOMA 技术配对成组,对 NOMA 组的用户电信号进行功率复用,通过 PLC 调制器后发送到电力线路,信号在电力线信道上传输时受到电力线噪声叠加的干扰,到达 VLC 的 LED 设备,LED 通过内置设备的通信芯片放大、调制和转发信号,将 PLC 电信号转换为 VLC 光信号,光信号经过 LED 辐射和无线传输,到达 VLC 的接收端,VLC 接收端的光电检测器接收、放大和解调 VLC 光信号,并进行 NOMA 解调,获得发送端用户数据.

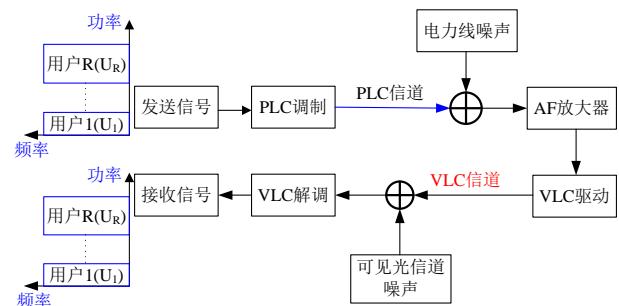


图 1 基于 NOMA 的 PLC-VLC 系统模型

在图 1 中,设 PLC-VLC 系统总带宽为 W ,共分为 N_p 个子载波,因此每个子载波的带宽为 $W_i = W/N_p$. 多个 NOMA 用户的调制信号在子载波的时域和频域重叠编码,而在功率域使用 NOMA 复用方式. 若每个子载波复用的用户数为 R ,LED 向第 l 个子载波中的第 u 个用户发送的信息为 $X_{l,u}$,则 LED 发射端发送的信号为多个用户的功率复用调制信号之和^[17],即

$$X = \sum_{l=1}^{N_p} \sum_{u=1}^U \sqrt{p_{l,u}} X_{l,u} \quad (1)$$

式(1)中, $p_{l,u}$ 表示给第 l 个子载波中第 u 个用户分配的功率; $\sum_{l=1}^{N_p} \sum_{u=1}^U p_{l,u} = P$, P 是 LED 总发射功率.

在 NOMA 技术中, 每个子载波可以被多个用户共享使用, 而使用同一个子载波上的用户之间是非正交的功率复用叠加, 为了降低干扰和便于接收端的 NOMA 解调, 需要设计有效的 NOMA 用户配对方法和用户间的功率分配算法.

第 l 个子载波第 u 个用户的接收信号 $Y_{l,u}$ [18] 为

$$Y_{l,u} = h_{l,u} X + w_l \quad (2)$$

式(2)中, $h_{l,u}$ 表示第 l 个子载波上第 u 个用户到 LED 发射端之间的信道增益; w_l 表示该用户接收的各种噪声值之和, 各种噪声遵从高斯分布特性; X 为功率复用的 NOMA 组用户的信号之和.

由于 NOMA 技术中用户之间是非正交叠加传输, 因此会产生多个用户之间相互干扰的问题. 在 NOMA 下行链路中, 接收端为了解调出相互干扰的 NOMA 组内多用户信息, 常采用串行干扰消除 (Successive Interference Cancellation, SIC) 技术 [17-19]. SIC 技术在接收信号的解调过程中, 需要通过 NOMA 组内各用户的信道增益来判断信道条件, 从而确定各用户的解调顺序. 其中, 常用的一种排序方法是根据信干噪比 (Signal to Interference and Noise Ratio, SINR) 的大小降序排序, 并执行串行干扰消除, SINR 的计算公式为

$$\text{SINR} = P_u |h_u|^2 / (|h_l|^2 \sum_{i=1}^{N_p} P_u + N_0) \quad (3)$$

式(3)中, P_u 为 NOMA 组的用户 u 发射功率, h_u 为用户信道增益, N_0 为高斯白噪声的功率谱密度值.

通过 NOMA 技术复用的用户信号, 在通过 PLC 线路传输后到达 VLC 的 LED 构成的接入点 (AP), VLC AP 调制后辐射 VLC 无线光信号, 由接收端的用户设备接收. Jani 等人改进了 PLC 传输的通信模型 [20], 其信道传输函数为

$$H_p(f) = \sum_{i=1}^N g_i e^{-(a_0 + a_1 f) l_i} e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4)$$

式(4)中, 通过 PLC 多径传输的 N 路信号, 每一条路径 i 都有一个加权因子 g_i , 它表示这条路径的传输因子, 且 $-1 \leq g_i \leq 1$, 当一条路径上的折射、反射越多时, g_i 值越小; a_0, a_1 是路径传输损耗的常量参数; l_i 表示第 i 条路径的长度; τ_i 表示第 i 条路径的传输延迟时间, 且 $\tau_i = l_i / v_p$, 这里的 v_p 表示相位速度, 低压电力线 $v_p = 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$.

PLC 的子载波 l 承载用户 u 的信号被第 k 个 VLC AP 的 LED 灯接收, 接收信号在频域用 $Y_p^{k,u}(l)$ 表示为

$$Y_p^{k,u}(l) = H_p^{k,u}(l) X_p(l) + N_p^{k,u}(l) \quad (5)$$

式(5)中, $X_p(l)$ 表示 PLC 的子载波 l 上的频域传输符号; $H_p^{k,u}(l)$ 和 $N_p^{k,u}(l)$ 分别表示 PLC 中子载波 l 上用户 u 的信号被第 k 个 VLC AP 的 LED 灯接收的信道增益和高斯噪声幅值, 且噪声的功率谱密度服从 $(0, \sigma_{\text{pn},u}^2(l))$ 分布特性, 其中的 $\sigma_{\text{pn},u}^2(l)$ 表示 PLC 的子载波 l 上用户 u 的信号被第 k 个 VLC AP 的 LED 灯接收的噪声功率谱密度值, $\sigma_{\text{pn},u}^2(l) = E[|N_p^{k,u}(l)|^2]$.

移动终端的接收器和 VLC AP 的光源之间的直射信道增益为

$$H_v(f) = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{\text{PD}}}{2\pi D_d^2} \cos^m(\phi) T_s(\phi) g(\phi) \cos(\phi), & \phi \leq \phi_c \\ 0, & \phi > \phi_c \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, 光朗伯辐射阶数 $m = \lceil -\ln 2 / \ln(\cos \phi_{1/2}) \rceil$, $\phi_{1/2}$ 是 LED 的辐射半功率角, A_{PD} 是 PD 的表面积, $T_s(\phi)$ 是光学滤波器的增益, $g(\phi) = n^2 / \sin^2 \phi$ 是光学镜头的增益, n 是折射率, ϕ_c 是 PD 的视场角.

用户接收来自第 k 个 VLC AP 的子载波 l 的信号用 $Y_v^{k,u}(l)$ 表示为

$$Y_v^{k,u}(l) = H_v^{k,u}(l) X_v^k(l) + N_v^{k,u}(l) \quad (7)$$

式(7)中, $X_v^k(l)$ 表示第 k 个 LED 灯中子载波 l 上的频域信号; $H_v^{k,u}(l)$ 和 $N_v^{k,u}(l)$ 分别表示第 k 个 LED 灯中子载波 l 上用户 u 的信道增益和噪声值, 且噪声的功率谱密度服从 $(0, \sigma_{\text{vn},u}^2(n))$ 分布特性, $\sigma_{\text{vn},u}^2(n)$ 表示用户 u 接收的噪声功率, 即 $\sigma_{\text{vn},u}^2(n) = E[|N_v^{k,u}(l)|^2]$. 若式(7)中的 $X_v^k(l) = \beta Y_p^{k,u}(l)$, β 是放大系数, 代入式(5), 则 $Y_v^{k,u}(l)$ 可写为

$$Y_v^{k,u}(l) = \beta H_v^{k,u}(l) \cdot H_p^{k,u}(l) \cdot X_p(l) + \beta H_v^{k,u}(l) \cdot N_p^{k,u}(l) + N_v^{k,u}(l) \quad (8)$$

因此, PLC 和 VLC 采用子载波 l 级联传输的混合信道增益 $H_{\text{hpv}}^{k,u}(l)$ 可以表示为

$$H_{\text{hpv}}^{k,u}(l) = \beta H_v^{k,u}(l) H_p^{k,u}(l) \quad (9)$$

根据式(9), 则用户 u 使用第 k 个 LED 的第 l 子载波接收信号的速率为

$$R(u) = \frac{B}{N_p} \cdot \log_2 \left[1 + \frac{|H_{\text{hpv}}^{k,u}(l)|^2 P_u^{l,u}}{\sum_{i=\pi_n^{-1}(u)+1}^U [|H_{\text{hpv}}^{k,\pi_n(i)}(l)|^2 P_{\pi_n(i)}^{l,u}] + \sigma_{\text{hpvn},u}^2(l)} \right] \quad (10)$$

式(10)中, B 表示 LED 总带宽; $\sigma_{\text{hpvn},u}^2(l)$ 表示 NOMA 组使用子载波 l 的噪声功率; $\pi_n^{-1}(u)$ 为用户 u 在子载波 l 的解码顺序, 即当 $\pi_n^{-1}(u) = i$ 时, $\pi_n(i) = u$.

由于室内 PLC-VLC 系统环境不规范, 式(4)中 N 较

大时,每路信号的噪声模型不固定,因此,信号传输模型的多径模型难以准确计算,使得接收信号的计算比较困难;同时,不同的配对成 NOMA 组,NOMA 组的载波和 NOMA 组内用户间功率的分配方法,都对室内 PLC-VLC 系统的吞吐量、载波资源利用率和用户公平性产生很大的影响^[15,16].为此,本文基于遗传算法改进 PLC-VLC 系统的 NOMA 配对方法和载波与功率分配方法,提出一种改进遗传算法优化用户配对联合子载波分配(IGA-JUPSA)方法.

3 室内 PLC-VLC 系统 NOMA 配对联合子载波分配方法

在用户形成 NOMA 组阶段,本文所提的 IGA-JUPSA 方法以最大化 PLC-VLC 系统吞吐量为目标,设计根据信道增益值降序排列的用户分组和配对方法,降低接收端 SIC 解码的复杂度和 NOMA 组内用户之间的干扰;在子载波分配阶段,本文设计了以用户公平性为准则的适应度函数,采用改进的临界交叉和自适应变异方式,保证所设计的 IGA-JUPSA 方法能提高系统的吞吐量和保证用户的公平性,提高载波资源的利用率.

3.1 最优用户 NOMA 组方法设计

设在 PLC-VLC 系统中,电力线上共有 N_p 个 PLC 子载波,每个 LED 有 $N_p/4$ 个 VLC 子载波,设 K 个 LED 灯共提供 N_p 个 VLC 子载波,并且 PLC 中子载波 l 和 VLC 中子载波 l 的频谱相同.不失一般性,本文假设第 1 个 LED 灯上的索引号为 $1, 2, \dots, N_p/K$,第 2 个 LED 灯上的索引号为 $N_p/K + 1, \dots, 2N_p/K$,以此类推.每个 LED 灯只须把所接收的 PLC 信号按照对应的索引号放大转发到对应的 VLC 子载波即可.

设 PLC-VLC 系统的用户数目为 U ,忽略噪声的影响,PLC 信道估算中令 $N=4$,使用式(9)计算用户 u 使用各子载波的平均信道增益,并根据平均信道增益排序用户.若 U 不为偶数,将中间的一个用户单列一组,对剩下的偶数个用户进行如下的 NOMA 配对.设系统有 N_p 个子载波,则 U 个用户的 PLC-VLC 系统,有 $N_p \times U$ 个信道增益.例如:用户采用任一子载波传输,都可由式(11)计算对应的信道增益,则用户 u 的平均信道增益 $|h_u|$ 为

$$|h_u| = \frac{1}{N_p} \sum_{l=1}^{N_p} |H_{\text{hpv}}^{k,u}(l)| \quad (11)$$

对于 U 个用户,不失一般性,假设用户的信道增益满足 $|h_1| < |h_2| < \dots < |h_U|$.根据最优用户 NOMA 配对研究结果^[16],需要将用户 m 和用户 $U-m+1$ 配对,使得系统的吞吐量最大,即用户 1 和用户 U 配对,用户 2 和用户 $U-1$ 配对等.但是在上述配对规则中,会出现相邻的

个用户配对在一起,即用户 $U/2$ 和用户 $U/2+1$ 配对在一起,此时接收端 SIC 解调器复杂度较高.针对该问题,不同于文献[16]中按照信道增益排序好的用户分成 2 组,即信道增益较好的用户为一组,信道增益较差的用户为一组,本文提出将按照平均信道增益的升序排好的用户分成 4 组,并且第一组的用户和第三组的用户配对,第二组的用户和第四组的用户配对.每两组的配对方法使用文献[16]提出的最优用户配对方法,从而避免相邻用户配对在一起,以提高系统的吞吐量.

3.2 最优子载波分配方法设计

为了找到增加系统容量和提高用户公平性的 NOMA 对的低复杂度的子载波分配方法,本文提出一种改进的遗传算法进行优化子载波的分配.

本文首先构造染色体,使染色体中各基因位置表示子载波编号,基因的二元值表示 NOMA 组的 2 个用户序号,如基因位 $(i,j)_n$ 表示子载波 n 分配给用户 i 和用户 j 的 NOMA 组.因此,PLC-VLC 系统的一种子载波分配方法可以表示为一条染色体 $c = \left[(1, \frac{3}{4}U)_1, (2, \frac{3}{4}U-1)_2, \dots, (\frac{U}{2}, \frac{3}{4}U+1)_{N_p} \right]$, U 为用户数目,在遗传算法中表示一个种群中的个体数目,一条染色体代表一个个体.例如:染色体 $c_1 = \left[(1, 6)_1, (2, 5)_2, (3, 8)_3, (4, 7)_4, (1, 6)_5 \right]$ 表示 PLC-VLC 系统中共有 5 个子载波,服务 4 个 NOMA 组的 8 个用户,分别是子载波 1 和 5 分配给 NOMA 用户对 $(1, 6)$,子载波 2 分配给 NOMA 用户对 $(2, 5)$,子载波 2 分配给 NOMA 用户对 $(3, 8)$,子载波 4 分配给 NOMA 用户对 $(4, 7)$.从染色体结构可知,一个 NOMA 组的用户可以使用多个子载波资源.

本文设计能提高 PLC-VLC 系统吞吐量和用户公平性的个体 c 的适应度函数 $f(c)$ 为

$$f(c) = \sum_{u \in U} \log R(u) \quad (12)$$

式(12)中, $R(u)$ 计算如式(10),表示用户 u 在 PLC-VLC 系统中获得的接入速率; $\sum_{u \in U} \log R(u)$ 表示系统吞吐量.

在本文的遗传算法中,采用轮盘赌方法,根据个体的适应度函数值选择个体,个体被选中概率为

$$P_{\text{sel}}(c) = \frac{f(c)}{\sum_{m=1}^U f(m)} \quad (13)$$

式(13)中, $\sum_{m=1}^U f(m)$ 为种群中所有个体的适应度函数值之和.

同时,本文提出了基于交叉临界值的基因交叉方式互换基因,基因位交叉操作的临界值 r 为

$$r = \frac{1+2\sqrt{\frac{g}{G}}}{3} \quad (14)$$

式(14)中, g 表示该种群的进化代数, G 表示该种群的总进化代数. 由式(14)可知, $r \in (\frac{1}{3}, 1]$, 随着进化代数 g 的增加而增加. 定义两个个体的相似度为

$$s = \frac{g_c}{N_p} \quad (15)$$

式(15)中, g_c 表示两个个体的最长相同基因位数. 若两个个体的相似度 $s < r$, 则两个个体进行基因位的交叉操作; 否则, 不交叉操作基因位位置, 以保护优秀的基因模式, 即保护 NOMA 配对的子载波分配结果.

在变异操作中, 本文采用自适应变异操作, 根据种群中染色体最大适应度值和平均适应度值自适应地调整变异概率(染色体的适应度值比较大时, 变异概率比较小; 染色体的适应度值比较小时, 变异概率比较大), 以加快遗传算法的收敛速率和解决算法局部收敛问题. 本文自适应变异概率 P_m 为

$$P_m = \begin{cases} \frac{\arcsin(\frac{f_{avg}}{f_{max}})}{\arcsin(\frac{f(c)}{f_{max}})}, & f(c) \geq f_{avg} \\ P_{mmax}, & f(c) < f_{avg} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中, P_{mmax} 为个体最大变异概率, f_{avg} 为种群中染色体的平均适应度值, f_{max} 为染色体的最大适应度值, $f(c)$ 为待变异染色体的适应度值.

3.3 联合用户 NOMA 组和子载波分配方法步骤

IGA-JUPSA 算法具体步骤如算法 1 所示.

本文提出的 IGA-JUPSA 算法包括根据式(11)计算 $N_p \times U$ 个信道平均增益, PLC-VLC 系统总载波数目 N_p , 用户数目 U , 并根据信道增益降序排列, 所需比较次数 $O(\log_2(N_p \times U!))$; IGA 算法在资源分配时执行最多 G 轮迭代, 每轮迭代中 NOMA 组最多为 $\lceil U/2 \rceil$, 每组选择 N_p 中一个子载波构造染色体, 种群最大变异概率 P_{mmax} , 资源分配阶段总的时间复杂度为 $O(G \times \lceil U/2 \rceil \times N_p \times P_{mmax})$, 则 IGA-JUPSA 算法总的时间复杂度为 $O(\log_2(N_p \times U!) + G \times \lceil U/2 \rceil \times N_p \times P_{mmax})$.

采用经典遗传算法的 GA-JUPSA 算法复杂度为 $O(\log_2(N_p \times U!) + G \times \lceil U/2 \rceil \times N_p)$. RUPSA 算法采用随机配对 NOMA 的方法, 因此不需对信道增益排序, 在 NOMA 配对环节的复杂度比较低, 但是其功率分配和子载波分配环节需要计算信道增益比功率分配, 载波分配中需要进行轮询用户和信道增益迭代, 则 IGA-RUPSA 算法的时间复杂度为 $O(N_p \times U + G \times U \times N_p \times P_{mmax})$.

算法 1 IGA-JUPSA 算法

输入: 室内系统参数, 包括室内环境的尺寸、用户数目 U 、PLC-VLC 系统的子载波数目 N_p 、LED 阵列的器件参数、接收机位置、接收机的参数, $N=4$ 等, 设迭代计数器 $g=1$, 输入最大迭代数 G

输出: PLC-VLC 系统中用户 NOM 配对组的方法和子载波分配方法

步骤 1: 根据式(9)和式(11)计算 PLC-VLC 系统所有用户的平均信道增益值, 并根据用户的平均信道增益降序排列用户;

步骤 2: 判断排序用户数是否可以被 2 整除, 如果不可以, 则将第 1 个用户作为一个 NOMA 组, 从排序表中删除该用;

步骤 3: 判断排序表中剩余用户是否可以被 4 整除, 若不可以, 将排序表中的第 1 个用户和最后 1 个用户构成一个 NOMA 组, 并从排序表中删除这 2 个用户;

步骤 4: 将排序表中剩余用户分成 4 组, 第 1 组和第 3 组按照 3.1 节所述的最优用户配对方法构成 NOMA 组, 第 2 组和第 4 组也按 3.1 节所述最优用户配对方法构成 NOMA 组;

步骤 5: 根据用户的 NOMA 配对和系统中的可用子载波资源, 构造个体的初始染色体, 形成初始种群;

步骤 6: 根据式(12)计算种群中每个个体的适应度函数值 $f(c)$;

步骤 7: 若 $g > G$, 或者连续 15 代种群中最优个体的适应度函数值 $f(c)$ 没有改变, 输出种群中个体代表的用户 NOMA 配对方法和子载波分配方法, 算法结束;

步骤 8: 执行轮盘赌操作, 按式(13)计算值, 概率选择种群的个体;

步骤 9: 根据式(14)和式(15)计算种群中各个体的染色体交叉操作阈值和染色体间的相似度, 基于交叉临界值进行个体的基因的交叉操作;

步骤 10: 根据式(16)对个体的染色体进行自适应变异操作, 生成新种群;

步骤 11: 进化代数 $g=g+1$, 转步骤 6.

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真环境

为了验证本文所提 IGA-JUPSA 方法的性能, 实验假设的房间大小为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$, 假设的 4 个 LED 灯的位置分别为 $(1.25\text{m}, 1.25\text{m}, 3\text{m})$, $(1.25\text{m}, -1.25\text{m}, 3\text{m})$, $(-1.25\text{m}, 1.25\text{m}, 3\text{m})$ 和 $(-1.25\text{m}, -1.25\text{m}, 3\text{m})$. 噪声的功率谱密度为 10^{-24}W/Hz . 公式(4)中, PLC 系统多路传输的路径数目 $N=4$, l_i 代表第 i 个 LED 接入到 PLC 调制解调器的电力线的长度^[20], $l_1=7\text{m}$, $l_2=8\text{m}$, $l_3=9\text{m}$, $l_4=10\text{m}$, $g_1=0.64$, $g_2=0.38$, $g_3=-0.15$, $g_4=0.05$, $a_0=0$, $a_1=7.8 \times 10^{-10}$, 其余参数如表 1 所示.

在上述条件下, 比较 IGA-JUPSA 方法和基于传统遗传算法的 JUPSA (Genetic Algorithm-based Joint User Pairing and Subcarrier Allocation, GA-JUPSA) 方法的算法收敛速度、系统吞吐量、用户公平性以及用户满意度的性能. 同时, 为了验证本文提出的用户 NOMA 配对方法可以增加系统的吞吐量, 还将对比采用用户随机 NOMA 配对和子载波分配方法(RUPSA)^[15]的性能. 为了验证本文提出的改进遗传算法可以提高算法的收敛速

表 1 IGA-JUPSA 算法仿真默认参数

参数	含义	数值
$\Phi_{1/2}$	发射机半功率角	70°
β	放大系数	1
P	每个 LED 发送功率	3W
B	VLC 系统总带宽	30MHz
N_p	VLC 子载波总数	128
φ_c	接收机视场角	90°
N_{popu}	遗传算法种群规模	50
$T_s(\varphi)$	光滤波器增益	1.0
n	折射率	1.0
A_{pd}	检测器物理表面积	1.0cm ²

度,对文献[15]提出的 RUPSA 分别用改进遗传算法和经典遗传算法优化其子载波分配方法,得到改进遗传算法的 RUPSA (Improved Genetic Algorithm-based Random User Pairing and Subcarrier Allocation, IGA-RUPSA) 方法和基于传统遗传算法的 RUPSA (Genetic Algorithm-based Random User Pairing and Subcarrier Allocation, GA-RUPSA) 方法. 因此,本文所提 IGA-JUPSA 方法的对比方法为 GA-JUPSA, IGA-RUPSA, GA-RUPSA 和 UP-FTP A^[16],为了对比 NOMA 配对方法和子载波分配方法对系统性能的影响,本文将 UP-FTP A 的功率分配方法修改为信道增益比功率分配方法,即本文方法和对比方法都采用相同的信道增益比功率分配方法. 设遗传算法最大进化代数为 300, GA-JUPSA 交叉概率 $P_c=0.30$, 变异概率 $P_m=0.1$; IGA-JUPSA 变异概率由式(15)计算决定,最大变异概率 $P_{m\max}=0.05$; GA-RUPSA 方法的交叉概率 $P_c=0.30$, 变异概率 $P_m=0.1$; IGA-RUPSA 的变异概率由式(15)计算决定,最大变异概率 $P_{m\max}=0.05$.

4.2 仿真结果及分析

在表 2 中,对 IGA-JUPSA 方法、GA-JUPSA 方法、IGA-RUPSA 方法和 GA-RUPSA 方法的收敛性能分析后,可以发现:当用户 NOMA 配对方式确定时,本文所提的 IGA-JUPSA 可以提高子载波分配的收敛速度,并获得较高的平均用户速率. 采用 IGA 的方法是采用 GA 的方法的收敛所需迭代次数的 1/3,这是因为改进的遗传算法使用基于交叉临界值的交叉方式和自适应的变异操作,加快了算法的收敛速度. 因此,本文提出的改进的遗传算法具有较快的收敛速度. 在各对比方法收敛时,IGA-JUPSA 方法获得的系统平均用户速率比 IGA-RUPSA 方法提高了 20.00%, GA-JUPSA 方法获得的系统平均用户速率比 GA-RUPSA 方法提高了 21.28%. 因此,当使用相同的子载波分配算法时,采用最优用户 NOMA 配对的 IGA-JUPSA 方法可以显著提高系统的平均用户速率.

图 2 展示了 PLC-VLC 系统中用户公平性性能. 从

表 2 4 种算法收敛性能对比

方法	收敛时的迭代次数	系统平均用户速率(Mbps)
IGA-JUPSA	52	60
GA-JUPSA	163	61.25
IGA-RUPSA	55	50
GA-RUPSA	168	50.5

图 2 可以发现,随着用户数目的增加,PLC-VLC 系统内的空闲子载波资源减少,用户竞争子载波资源更加激烈,信道增益较低的用户获取子载波和功率更难,因此,PLC-VLC 系统中用户的公平性下降. 相比 UP-FTP A 方法,本文所提的 IGA-JUPSA 和 GA-JUPSA 方法获得了更大的系统公平性,这是因为,UP-FTP A 方法采用用户划分 2 组,且不同组的首尾用户进行 NOMA 配对策略,可能导致信道特性居中的临近用户形成 NOMA 配对,而本文采用用户划分 4 组的交叉 NOMA 用户配对策略可以避免信道增益相近的用户形成 NOMA 配对,从而避免了 NOMA 组内用户间的干扰且提高了信道特性较差用户获取子载波和功率分配的能力,提高了用户公平性. 比较 GA-JUPSA 和 IGA-JUPSA 方法的用户公平性能发现,采用改进遗传算法优化子载波分配的 IGA-JUPSA 方法比采用改进遗传算法优化子载波分配的 GA-JUPSA 方法获得了更高的用户公平性,这是因为,改进的遗传算法在设计功率分配的适应度函数式(12)时,能兼顾不同信道状况的用户的 NOMA 用户组优化子载波分配,能最大限度满足 NOMA 组用户请求速率需求,从而提高了整个系统内用户的公平性.

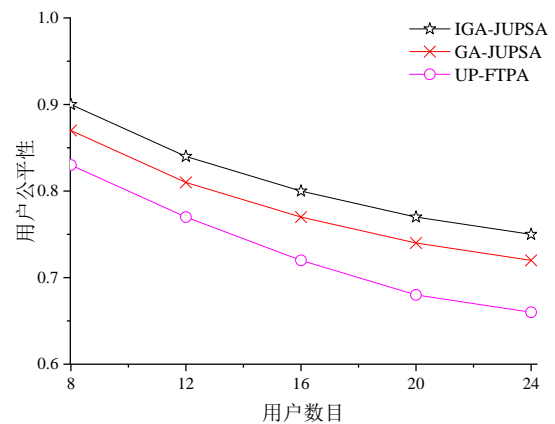


图 2 PLC-VLC 用户公平性随用户数量变化情况

图 3 表示 PLC-VLC 系统的吞吐量性能. 随着用户数目的增加,系统的吞吐量也增加,在相同用户数目情况下,本文所提的 IGA-JUPSA 方法获得的吞吐量略高于采用传统遗传算法的 GA-JUPSA 方法,而采用随机 NOMA 配对的 IGA-RUPSA 方法的吞吐量也大于采用传统遗传算法的 GA-RUPSA 方法,因此,改进遗传算法对

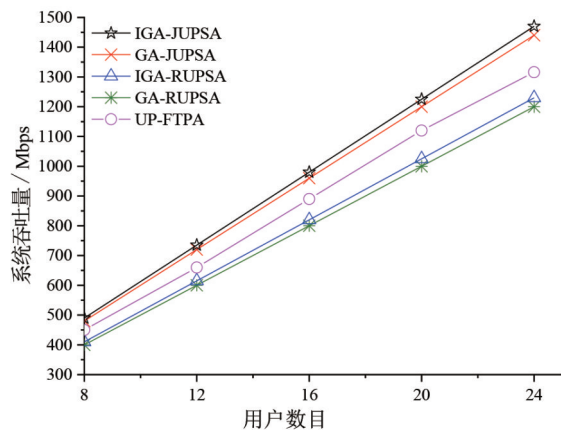


图3 PLC-VLC系统吞吐量随用户数量变化情况

2种用户配对和子载波分配方法的系统吞吐量都有所改善.同时,在用户数目相同情况下,本所提出的IGA-JUPSA方法的吞吐量大于UP-FTP方法,这是因为本文的NOMA配对方法避免了信道传输特性相近的用户分配在一个NOMA组,从而解决了接收端NOMA组内用户的干扰问题且提高了SIC解码性能.同时,从图3还可以看出,本文所提IGA-JUPSA方法的系统吞吐量比IGA-RUPSA方法的系统吞吐量提高了约21%,这是因为本文采用的用户NOMA配对方法可以显著优化NOMA用户的组合,有效避免干扰的NOMA配对方法比用户随机NOMA配对更能显著提高系统的吞吐量.因此,分析图2和图3可以得出,本文所提IGA-JUPSA方法能够在保证系统吞吐量的同时,提高用户的公平性.

考虑到在PLC-VLC室内环境中,用户才是系统性能的直接反馈者,本文定义满意用户为速率大于或等于目标速率1Mbps的用户,满意用户比例为满意用户数与用户总数的比值.图4为PLC-VLC系统中满意用户比例随用户数量的变化情况.从图4可以看出,随着用户数目增多,PLC-VLC系统中满意用户比例下降,这是因为随着系统中用户数的增加,用户之间资源竞争

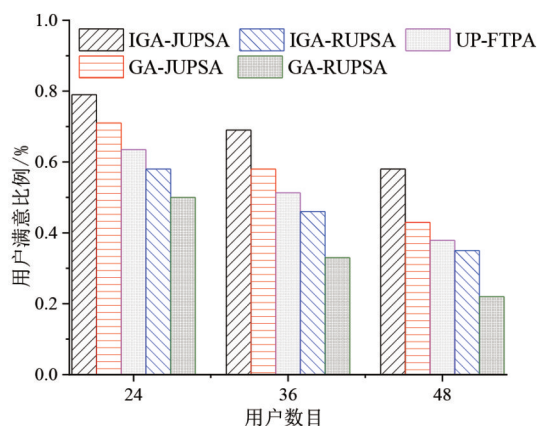


图4 PLC-VLC系统满意用户比例随用户数量变化情况

更为激烈,可以分配给用户的用户平均子载波数目和用户平均功率都减少.相比其他4方法,本文所提的IGA-JUPSA方法的满意用户比例最高,这是因为JUPSA方法可以优化NOMA的配对,使系统吞吐量提高,而IGA算法可以优化子载波的分配,提高NOMA组用户间的公平性,因此,IGA-JUPSA方法使用户的平均速率增加且不同NOMA组件用户的速率差别减小,更多的用户能获得满意的数据接入速率,从而提高了PLC-VLC系统的满意用户比例.

5 总结

本文研究了将NOMA技术用于提高PLC-VLC系统吞吐量的优势,提出了一种在PLC-VLC系统性能和计算复杂度之间取得平衡的IGA-JUPSA方法,该方法采用改进的遗传算法联合优化NOMA用户的配对和子载波分配,提高了系统的吞吐量和用户接入网络的公平性.该方法能充分利用PLC系统解决VLC室内信息传输范围有限的问题,在满足照明的同时提高了信息接入的速度,是未来高速用户业务接入和联网的有效方式.

参考文献

- [1] Khalid H, Waris F, Asif H M. Design of an integrated power line communication (PLC)-visible light communication system for data communication[J]. *Lasers in Engineering*, 2018, 40(1): 107 - 125.
- [2] 雷新颖, 王成. 一种多孔径接收器的设计及其可见光通信系统[J]. *重庆邮电大学学报*, 2021, 33(1): 59 - 66.
Lei X Y, Wang C. Design of a multiple bore diameter receiver and its visible communication system[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 33(1): 59 - 66. (in Chinese).
- [3] Bolaji A G, Shongwe T. BPSK-OFDM versus QFSK-OFDM in combating the effects of narrowband interference and impulsive noise in power line communication [A]. *International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*[C]. Budapest, Hungary: IEEE, 2018. 1 - 6.
- [4] Liu S C, Yang F, Song J, et al. An optimal interleaving scheme with maximum time-frequency diversity for PLC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(3): 1007 - 1014.
- [5] Bolaji A G, Shongwe T. Performance comparison of modified BPSK-OFDM and QFSK-OFDM in PLC channel noise[J]. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2020, 66(4): 499 - 605.
- [6] Komine T, Nakagawa M. Integrated system of white LED

- visible-light communication and power-line communication[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(1): 71 – 79.
- [7] 孙帮成, 丁文伯, 闫阳天, 等. PLC 和 VLC 融合的车厢内宽带视频服务系统[J]. 电视技术, 2015, 39(11): 57 – 60.
Sun B C, Ding W B, Yan Y T, et al. PLC and VLC integrated system for in-coach broadband video service[J]. Video Engineering, 2015, 39(11): 57 – 60. (in Chinese)
- [8] Ndjiongue A R, Shongwe T, Ferreira HC, et al. Cascaded PLC-VLC channel using OFDM and CSK techniques[A]. IEEE Global Communications Conference[C]. San Diego, USA: IEEE, 2015.1 – 6.
- [9] Song J, Ding W B, Yang F, et al. An indoor broadband broadcasting system based on PLC and VLC[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2015, 61(2): 299 – 308.
- [10] Chen M C, You S H, Wang Y, et al. Performance analysis of pilot-based OFDM channel estimation for hybrid PLC&VLC system[A]. International Conference on Optical Communications and Networks[C]. Hangzhou, China: IEEE, 2017. 1 – 3.
- [11] Ma H, Mostafa A, Lampe L, et al. Coordinated beamforming for downlink visible light communication networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(8): 3571 – 3582.
- [12] Kashef M, Abdallah M, Al-Dhahir N, et al. On the impact of PLC backhauling in multi-user hybrid VLC/RF communication systems[A]. Global Communications Conference[C]. Washington DC, USA: IEEE, 2016. 1 – 6.
- [13] Sun Y, Ng D W K, Ding Z G, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for full-duplex multicarrier non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 1077 – 1091.
- [14] Al-Abbasi Z Q, So D K C. Resource allocation in non-orthogonal and hybrid multiple access system with proportional rate constraint[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(10): 6309 – 6320.
- [15] Tao S, Yu G, Li Q, et al. Strategy-based gain ratio power allocation in non-orthogonal multiple access for indoor visible light communication networks[J]. IEEE Access, 2019, 7(2): 15250 – 15261.
- [16] Janjua M B, Costa D B D, Arslan H. User pairing and power allocation strategies for 3D VLC-NOMA systems [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2020, 9(6): 866 – 870.
- [17] 郝少伟, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于改进粒子群算法的多载波 NOMA 功率分配策略[J]. 电子学报, 2020, 48(10): 139 – 146.
- Hao S W, Li Y J, Zhao S H, et al. Multicarrier NOMA power allocation strategy based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(10): 139 – 146. (in Chinese)
- [18] 谢显中, 高龙龙, 卢华兵. VLC 网络中兼顾 QoS 和公平性的协作子载波与功率分配算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2021, 33(1): 7 – 17.
Xie X Z, Gao L L, Lu H B. Coordinated subcarrier and power allocation algorithms considering both QoS and fairness for VLC networks[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021, 33(1): 7 – 17. (in Chinese)
- [19] 李刚, 胡哲, 景小荣, 等. 基于改进梯度投影法的 MIMO-NOMA 系统迭代信号检测算法[J]. 重庆邮电大学学报, 2020, 32(4): 571 – 577.
Li G, Hu Z, Jing X R, et al. Iterative signal detection algorithm for MIMO-NOMA system based on improved gradient projection method[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020, 32(4): 571 – 577. (in Chinese)
- [20] Jani M, Garg P, Gupta A. Performance analysis of a mixed cooperative PLC – VLC system for indoor communication systems[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 14(1): 469 – 476.

作者简介



刘焕淋 女, 1970年生, 重庆人. 重庆邮电大学教授、博士和硕士生导师. 主要研究方向为光通信技术和网络.
E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn



黄美娜 女, 1994年生, 广东潮州人. 重庆邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为可见光通信技术.



陈勇 男, 1963年生, 重庆人. 重庆邮电大学教授、硕士生导师. 主要研究方向为自动控制 and 光信号处理.