

文章编号 1672-6634(2024)05-0048-12

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024020006

室内 VLC-WiFi 异构网络中多色载波资源分配

陈 勇¹, 张薇薇¹, 刘焕淋², 陈金林²

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

摘 要 可见光通信接入点(VLC AP)在室内密集部署的方式在扩大 VLC-WiFi 系统容量的同时,增加了覆盖的小区间干扰。为了降低小区间干扰,提高系统的吞吐量和平均用户满意度,本文设计了多色载波分配与功率控制(MCAPC)的资源分配方法。该方法依据 VLC AP 的部署位置和信道特性,采用软频率复用方法确定各 VLC AP 的无干扰的主载波和多色副载波,并设计基于匹配博弈的载波和子频带分配算法为用户分配异构网络的频带资源;最后,设计基于功率控制效用值的干扰抑制的载波功率控制算法进一步抑制小区间干扰。研究表明,所提 MCAPC 方法能够提高室内多色 VLC-WiFi 异构网的系统吞吐量和用户的平均满意度。

关键词 异构网络;小区间干扰;多色载波;功率控制;系统吞吐量

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



A Method of Multi-Color Carrier Resource Allocation for Indoor VLC-WiFi Heterogeneous Network

CHEN Yong¹, ZHANG Weiwei¹, LIU Huanlin², CHEN Jinlin²

(1. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract The dense deployment of visible light communication (VLC) access points (APs) indoors expands the capacity of the VLC-WiFi (Wireless Fidelity) system, but it leads to increase the inter cell interference (ICI). For decreasing the ICI and increasing the system throughput and mean user satisfaction, a resource allocation method of multi-color carrier allocation and power control (MCAPC) is designed to put forward in the paper. According to the VLC AP deployment location and channel characteristics, the proposed MCAPC method uses soft frequency multiplexing to determine the interference free main carrier and multi-color subcarriers for each VLC AP. Then, the carrier and subcarrier allocation algorithm based on matching game is designed to allocate the band resources for users in heterogeneous networks. Finally, a carrier power control algorithm based on utility value of power control for interference suppression is designed to further suppress the ICI. Simulation results show that the proposed method can effectively improve

收稿日期: 2024-02-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977021); 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0734)资助

通信作者: 陈勇, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 可见光通信, E-mail: chenrong@cqupt.edu.cn.

system throughput and increase the mean user satisfaction for the VLC-WiFi heterogeneous network.

Key words heterogeneous network; inter-cell interference; multi-color carrier; power control; system throughput

0 引言

随着互联网接入应用的快速增长以及业务带宽呈几何级增加,业务需求带宽资源不断增加,传统的射频通信(Radio Frequency, RF)将难以满足这些业务的网络接入需求^[1]。据统计,2035年,整个 RF 频谱都难以提供足够的业务所需资源^[2]。可见光通信部署的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)照明设备,能够提供接近 400 THz 无需授权的频谱资源,以及实现无电磁干扰和可靠的高速通信。而且现有 RGBY LED 可以通过红、绿、蓝、黄等色谱资源实现更高的数据速率与波分复用^[3],所以利用多色可见光通信(Visible Light Communication, VLC)可有效地支撑下一代短距高速通信接入的要求。

但是当前 VLC 通信系统存在上行传输困难、光线链路脆弱、绕射能力差和单个 LED 调制带宽有限等问题^[4]。而无线保真技术(Wireless Fidelity, WiFi)与 VLC 构成的异构网络,能够弥补单一接入网络的缺点^[5]。室内 VLC-WiFi 异构网络的 VLC 接入点(Access Point, AP)一般密集的部署在室内,将导致各 VLC AP 覆盖区域的高度重叠以及共享频谱时的小区间干扰(Inter Cell Interference, ICI)问题,降低了系统吞吐量和平均用户满意度的性能^[6]。因此,在 VLC-WiFi 异构网络的资源分配过程中考虑 ICI 管理,是发挥 VLC-WiFi 异构网络优势的关键。

从资源分配过程的时间域考虑 VLC AP 的 ICI 管理的角度出发,文献[7]设计了一种自适应的干扰管理机制,在每个时隙根据用户的位置建立干扰矩阵,找出不产生 ICI 且接纳较多用户的由 VLC AP 组成的极大独立集,从而自适应地避免同频干扰。文献[8]提出在不同调度周期内分别构建不同的无干扰用户集群, VLC AP 共同对每一调度周期内的集群用户提供服务。上述文献所提干扰管理方案都是基于时分多址,但仍然存在难以避免轮询时间长和由于分组过多,导致时延较高和用户体验效果降低的问题。

针对资源分配过程的频率域,从 VLC AP 的 ICI 管理的角度出发,有部分频率复用(Fractional Frequency Reuse, FFR)^[9,10]和软频率复用(Soft Frequency Reuse, SFR)^[11-13]这两种方法。文献[9]采用两种部分频率复用分配模式抑制 ICI 对于系统性能的影响,并基于部分频率复用设计以用户为中心的多址接入策略。文献[10]基于凸优化理论,提出了一种吞吐近似最优且复杂度为二次多项式复杂度的高效频谱分配算法。然而,文献[9,10]虽然能够利用频谱间隔分配解决 ICI 和提高系统性能,但是,其频率复用粒度较大和粗糙,使频谱利用率提高不显著。与 FFR 相比, SFR 用功率限定了频谱的使用程度,因此, SFR 可以获得更大的带宽和频谱效率。文献[11]提出将总带宽分为共享频带和可重用频带,采用 SFR 为无 ICI 的小区服务,以提高频谱资源利用率和最大化系统吞吐量。文献[12]证明在 VLC 系统中采用 SFR 技术,可以减小光信号传输的误比特率,从而提高信号传输质量和频谱效率。文献[13]基于 VLC 天然的多色优势,提出了一种新的跨 AP 的联合分配资源的负载均衡方法,通过采用多色频谱的并行传输提高了用户接入 VLC 系统的数据速率。文献[14]设计了一种基于动态调度的干扰管理协调(Dynamic Scheduler for the Inter Cell Interference Coordination, DSINCIC)的优化方案,虽然本方案提高了系统吞吐量并降低了小区间干扰,但却没有考虑多色频谱资源的差异化以及残余干扰等问题。因此,采用 SFR 方式从频域的资源分配过程中进行 ICI 管理,可以克服调度时延过大的问题,还可以解决频谱划分僵硬而导致的频谱利用率降低问题。

除了在时域或频域的资源分配过程中进行 ICI 管理外,文献[15]通过协调有 ICI 的 VLC AP 发射功率大小,实现通信覆盖区域调整,缓解 VLC AP 间的干扰,从而提升 VLC 系统总容量。为了降低系统 ICI 和提高资源利用率,文献[16]提出一种区分业务质量的资源分配方法(Resource Allocation Method Based on User Service Differentiation, RAMUSD),该方法使用势博弈方法调整用户接入多色 VLC AP 和分配 ICI 避免的载波及功率因子,使各 AP 之间负载均衡,提高载波资源的利用率,并满足不同业务的服务质量要求。

基于以上分析,现有研究鲜有对多色 VLC 与 SFR 技术融合后的残余干扰问题以及 VLC 的多色频谱特

性研究,为了进一步降低多色 VLC-WiFi 系统的 ICI 和提高系统性能,研究设计多色载波分配与功率控制 (Multi-color Carrier Allocation and Power Control, MCAPC) 方法,该方法将 VLC 多色特性与软频率复用技术结合,实现抑制 ICI 同时提高系统吞吐量和平均用户满意度,并进一步通过控制有干扰的 VLC AP 的副载波的发射功率以抑制残余干扰,进一步提升系统性能。

1 系统模型

图 1 给出了室内多色 VLC-WiFi 异构网络模型,其中房间内 16 个 VLC AP 以阵列的形式排列在屋顶, WiFi AP 则置于房间中央, VLC AP 与 WiFi AP 都通过电力线连接到中央控制器上 (Central Control Unit, CCU)。对于通信传输任务,由于采用 VLC 进行上行传输时,用户端设备需要具备光信号发送功能和配备光源,所以,目前的 VLC 的上行传输

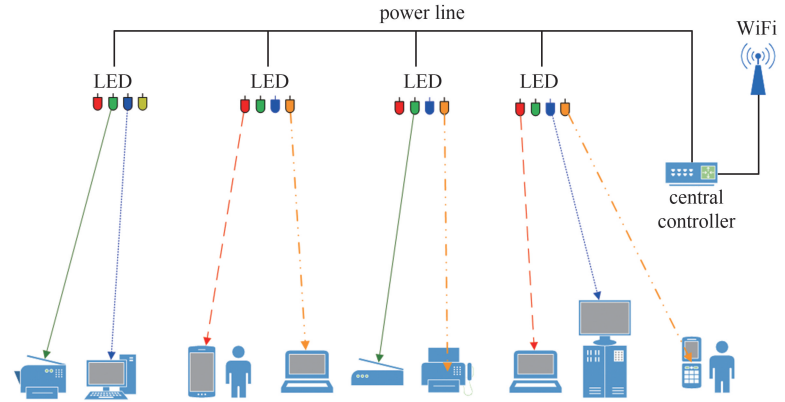


图 1 室内多色 VLC-WiFi 异构网络模型

Fig. 1 Indoor multicolor VLC-WiFi heterogeneous network model

较难;同时,在 VLC 下行传输中,由于室内家具和 LED 布局缺陷、以及行人遮挡,容易导致光线阻断或接收光信号微弱,不能实现光线通信,往往需要补充 WiFi 系统以提供无中断的通信链路。因此,在图 1 中,VLC AP 主要负责下行数据传输,WiFi 负责上行数据传输以及部分 VLC 阻断或接入 VLC 效用函数较低情况下的下行数据传输^[5]。考虑室内场景中用户的缓慢移动或者用户静止的情况,因此,VLC 和 WiFi 的信道条件的改变是缓慢的,可以认为由 CCU 收集的信道状态信息在一个执行策略和调度周期内是保持不变的^[8]。

在图 1 中,白光 LED 灯组由红色(Red)、绿色(Green)、蓝色(Blue)和黄色(Yellow)灯珠组成,成为 VLC AP 的发射天线,其发射的每个色谱作为最小可分配载波。为表达方便,以载波 $k=1,2,3,4$ 分别表示颜色 R/G/B/Y。R/G/B/Y 的波长分别为 650、500、450、600 nm,考虑到不同波长的光电转换效率不同,根据文献^[13],将光电转换效率分别设置为 0.44、0.23、0.15、0.37,单位为 A/W。

1.1 VLC 信道

由于室内墙面的反射衰减和较长光线距离导致的信号衰减增加,多数研究都忽略 VLC 非视距 (Non-Line-of-Sight, NLoS) 对接收信号的贡献^[5,6],主要考虑 VLC 的直射链路 (Line-of-Sight, LoS) 对光接收信号贡献。则室内用户 u 的光接收机与 VLC AP i 之间的 LoS 的下行信道增益可以表示为^[5,6]

$$H_{i,u}^v = \begin{cases} \frac{(m+1)A_D}{2\pi d_{i,u}^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) g(\psi) T(\psi), & 0 < \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi_c \leq \psi, \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_D 为光接收机的接收面积,朗伯辐射系数 $m = -\ln 2 / \ln[\cos(\varphi_{1/2})]^2$,其中 $\varphi_{1/2}$ 为发射机的半功率辐射角, φ 为 LED 辐射角, ψ 为接收机入射角, ψ_c 为接收机的视场角,且 $\psi \leq \psi_c$,接收机的光滤波增益和聚光器增益分别为 $T(\psi)$ 和 $g(\psi)$, $d_{i,u}$ 表示 VLC AP i 与用户 u 之间的 LoS 长度。

则 VLC AP i 采用载波 k 的 λ_u^v 个子频带到用户 u 光接收机的 SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) 值为^[3,14]

$$\gamma_{i,u,k}^v = \frac{(R_p^k H_{i,u}^v P_i^k)^2}{N_0^v \lambda_u^v B^v \sum_{j \in I, j \neq i} (R_p^k H_{j,u}^v P_j^k)^2}, \quad (2)$$

式中 R_p^k 为颜色 k 的光电转换系数, P_i^k 为 VLC AP i 中载波 k 的发射功率, I 为 VLC AP 集合, N_0^v 为 VLC 噪声功率谱密度,一般取值为 1×10^{-21} ^[3,14], B^v 为载波 k 一个子频带的带宽, λ_u^v 是 VLC AP 分配给用户 u 的子频带数目。根据香农公式,用户 u 接入 VLC AP i 采用载波 k 的 λ_u^v 个子频带的可达速率为^[3,4]

$$R_{i,u,k}^v = \lambda_u^v B^v \cdot \log_2(1 + \gamma_{i,u,k}^v) \quad (3)$$

1.2 WiFi 信道

对于 WiFi 信道,采用 IEEE 802.11 标准,工作在 2.4 GHz 频段的信道传播模型,则 WiFi AP l 到用户 u 的信道增益为^[9]

$$H_{l,u}^w = |H_0|^2 \times 10^{\frac{-L(d_u) + X_\sigma}{10}}, \quad (4)$$

式中 H_0 表示 WiFi 信道传递函数,服从标准的瑞利分布;阴影衰落由零均值、标准偏差为 10 dB 的高斯随机变量 X_σ 表示, $L(d_u)$ 代表信号在自由空间的路径损耗,单位为 dB, d_u 为 WiFi AP 到用户 u 的通信链路的长度^[18]。在图 1 模型中,室内布局一个 WiFi AP,所以 WiFi AP 无 ICI,则 WiFi AP 到用户 u 的 SINR 计为

$$\gamma_{l,u}^w = \frac{H_{l,u}^w P_l}{N_0^w B^w}, \quad (5)$$

式中 P_l 为 WiFi AP 的发射功率; N_0^w 为 WiFi 的背景噪声功率,取值一般为 -86 dBm^[9,18]; B^w 为 WiFi 的一个子载波带宽, λ_u^w 是 WiFi AP 分配给用户 u 的子频带数目,则用户 u 接入 WiFi AP 获得可达速率为

$$R_{l,u}^w = \lambda_u^w B^w \log_2(1 + \gamma_{l,u}^w) \quad (6)$$

因此,室内 VLC-WiFi 异构网络的系统总吞吐量为所有接入 VLC AP 和 WiFi 的总可达速率之和

$$T = \sum_u R_{i,u,k}^v + \sum_u R_{l,u}^w, \quad (7)$$

为使式(7)的数值增加,设计多色载波分配和功率控制(MCAPC)方法,采用抑制 ICI 的 VLC AP 簇主载波分配方法,对簇内的 VLC AP 采用 SFR 提高无 ICI 的主载波频谱利用率;同时,设计基于效用函数匹配博弈决策用户接入 VLC AP 或者 WiFi AP,对接入 VLC AP 用户,采用 VLC AP 多色载波和多子频带分配方法,对接入 WiFi AP 用户,采用比例公平方法为用户分配子频带,以增加平均用户满意度的同时,提高系统吞吐量;为了进一步抑制 VLC AP 副载波对相邻 VLC AP 主载波的干扰,设计基于功率控制效用值的干扰抑制的载波功率控制算法降低 ICI 和提高系统吞吐量。

2 多色载波分配与功率控制(MCAPC)方法

本文旨在通过优化载波分配和控制载波发射功率抑制 ICI 和提高系统吞吐量,则问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \max_{a_{i,u}^k, \lambda_u^w, \beta_i^k} T \\ \text{s. t. } & C_1: a_{i,u}^k \in \{0, 1\}, \forall k, \forall i, \forall u, \\ & C_2: \sum_i \sum_u a_{i,u}^k \leq 1, \forall k, \forall i, \forall u, \\ & C_3: 1 \leq \lambda_u^w \leq |C|, \forall k, \forall i, \forall u, \\ & C_4: \sum_{k \in K} \beta_i^k p_i^k \leq p_i, \forall k, \forall i, \\ & C_5: 0 < \beta_i^k \leq 1, \forall k, \forall i, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 p_i 为 VLC AP i 的总发射功率; p_i^k 为 VLC AP i 中载波 k 的发射功率, K 为载波集合; U 为请求接入 VLC-WiFi 异构网络中的用户集合; $a_{i,u}^k$ 表示 VLC AP i 的载波 k 是否服务用户 u , β_i^k 为 VLC AP i 的载波 k 的功率控制系数;约束条件 C_1 表示用户 u 是否关联 VLC AP i 并选择其载波 k ; C_2 表示 VLC AP 的一个载波最多分配给一个用户,是资源不重叠性约束;约束条件 C_3 表示 WiFi AP 为用户分配的载波数目介于 1 和 WiFi AP 总可用载波数目 $|C|$ 之间,是资源有限性约束;约束条件 C_4 与约束条件 C_5 是对于 VLC AP 载波功率的约束。

式(8)是属于 NP 难问题,即一个混合整数非线性优化问题,在有限的时间内难以求解^[10]。本文设计结合 VLC 多色特性与软频率复用技术的干扰管理方法将原问题分解为三部分进行求解:1) 根据 VLC AP 部署位置和信道特性,确定无 ICI 的 VLC AP 簇主载波,并采用 SFR 方法提高 VLC AP 簇内频谱利用率;2)

根据用户请求,根据效用函数,对接入 VLC 用户,采用匹配博弈策略为用户分配多色载波和子频带数目,对接入 WiFi 的用户,采用比例公平法为用户分配 WiFi AP 的子频带数目;3) 对存在 ICI 的 VLC AP,进一步采用抑制干扰方法调整 VLC AP 载波的发射功率,以进一步提升系统吞吐量。

2.1 基于多色载波确定 VLC AP 簇主载波

为了提高 VLC-WiFi 的吞吐量,并抑制相邻 VLC AP 重叠覆盖区的 ICI,本文设计基于多色载波抑制 ICI 干扰的 VLC AP 簇主载波确定算法,并采用 SFR 方法,为同一 VLC AP 簇内的各个 VLC AP 分配相同的主载波。在多色 VLC 中,光接收机对不同颜色载波具有不同的光电转换效率,多色特性使接收功率不同,因此,尽量保证优先确定 VLC AP 簇的主载波对提高系统吞吐量的贡献更大。

研究提出 VLC AP 簇的多色主载波确定算法,该算法根据 LED 白光的 4 色合成方法将 VLC AP 划分为 4 个多色载波,根据 VLC AP 的布局 and 信道信息,将无 ICI 且不相邻的 VLC AP 划分在一个 VLC AP 簇中,与之相邻的 VLC AP 则划分在不同的 VLC AP 簇中;计算用户与 VLC AP 或 WiFi AP 之间单位带宽的等效 SINR,确定用户接入哪个 VLC AP 簇或 WiFi AP;统计接入各 VLC AP 簇内用户数目并降序排列 VLC AP 簇;依次计算簇内 VLC AP 主载波分配的回报值,选择回报值最大的载波作为该 VLC AP 簇的主载波,其余颜色载波为该簇内各 VLC AP 的副载波,同一 VLC AP 簇内的各 VLC AP 采用 SFR 方法复用相同主载波,不同 VLC AP 簇采用不同主载波。

由于异构 VLC-WiFi 网络中 VLC 和 WiFi 资源不具有可比性,通过引入等效 SINR 为用户关联 VLC AP 或 WiFi AP 提供选择依据,这里的等效 SINR 指:为达成相同吞吐量所需的 SINR^[18],将 VLC AP i 服务用户 u 的 SINR 转换为 WiFi,如式(9)所示,其中 $\Gamma_w = 3$ dB 和 $\Gamma_v = 5.4$ dB 分别代表 WiFi 与 VLC 网络的信道编码损耗因子^[18]

$$\gamma_{i,u} = \Gamma_w \cdot \left(\left(1 + \frac{\gamma_{i,u,k}^v}{\Gamma_v} \right)^{(B^v/B^w)} - 1 \right), \quad (9)$$

为了降低 VLC AP 间的 ICI,优先为请求接入用户数多的 VLC AP 簇确定主载波,VLC AP 簇根据主载波确定的回报值为簇内各 VLC AP 采用 SFR 方法使用相同的主载波,这里,VLC AP 簇 i 选择主载波 k 的回报值 Q_i^k 为

$$Q_i^k = R_p^k \cdot P_i^k \cdot \max\{H_{i,u}^v\}, \quad (10)$$

式中选择用户与 VLC AP 簇 i 中最大信道增益值计算 VLC AP 簇 i 选择主载波 k 的回报值。

算法 1 基于多色载波确定 VLC AP 簇主载波

Alg. 1 Determines the main carrier of VLC AP cluster based on multi-color carriers

输入: VLC AP 数 $|I| - 1$, 1 个 WiFi AP, 请求接入异构网的用户数目 $|U|$, 各 VLC AP 位置信息, 用户各信道状态, 多色载波集合 K , $\mathbf{M} = [0]$;

输出: 各 VLC AP 簇及主载波矩阵 $\mathbf{M}$;

- (1) **for** $u = 1 : |U|$ **do**
- (2) 用户 u 由式(2)和式(5)计算与 VLC AP 和 WiFi AP 的一个子频带的 SINR, 并采用式(7)进行等效 SINR 转换;
- (3) 用户 u 接入等效 SINR 最大的 VLC AP 或 WiFi AP;
- (4) **end for**
- (5) **for** $m = 1 : (|I| - 1)$ **do**
- (6) 根据 VLC AP m 位置信息, 将该 VLC AP 加入互不相邻的 VLC AP 簇, 相邻 VLC AP 加入不同的 VLC AP 簇;
- (7) **end for**
- (8) 统计各个 VLC AP 簇的候选接入用户数, 依据接入用户数降序排列所有的 VLC AP 簇;
- (9) 采用图染色方法, 依次为没有确定主载波的 VLC AP 簇选择主载波 k , $k \in K$;
- (10) 根据式(10), 计算 VLC AP 簇 i 在分配主载波 k 时的回报值 Q_i^k ;
- (11) 将回报值 Q_i^k 最大的载波 k 作为 VLC AP 簇 i 的主载波, 更新主载波分配矩阵 $\mathbf{M}$, 并从集合 K 中删除已被分配的主载波 k ;
- (12) 若所有 VLC AP 簇主载波已确定, 并标记主载波为 k_0 , 输出 VLC AP 的主载波分配矩阵 $\mathbf{M}$; 否则, 返回步骤(9)。

图 2 所示为室内均匀分布的 16 个 LED 在一个功率辐射角 φ 覆盖下通信平面的主载波划分示意图,

LED 覆盖无色圆圈范围内采用副载波通信,有色区域采用 LED 主载波通信。一般地,LED 的主载波 k_0 采用最大交流功率 P^{k_0} ,各副载波采用的最大发射功率为 λP^{k_0} ,这里的 λ 为衰减系数, $0 < \lambda < 1$ ^[19]。例如,LED 2,LED 4,LED 10 和 LED 12 构成一个 VLC AP 簇,使用红色载波为其主载波,其余 3 色载波为其副载波。

2.2 基于匹配博弈的用户载波和子频带分配算法

确定各 VLC AP 的主载波后,其他颜色载波成为该 VLC AP 的副载波资源。紧接着,需要确定各 VLC AP 使用哪个载波的几个子频带接纳用户接入的申请,以抑制 ICI,提高系统吞吐量和平均用户满意度。为此,本文提出基于匹配博弈的用户载波和子频带分配算法,设计以接入 VLC AP 的用户的满意度函数作为用户匹配博弈的用户效用函数^[17]

$$\zeta_u = \frac{R_{i,u,k}^v}{\eta_u}, \quad (11)$$

式中 ζ_u 为用户 u 的效用函数, η_u 为用户 u 的请求速率,用户满意度确定了用户对该 VLC AP i 载波 k 的偏好值,偏好值越大表示用户越希望使用该载波。

在匹配博弈中,VLC AP 的效用函数定义为 VLC AP 分配各载波子频带给用户所获得的系统吞吐量,VLC AP 倾向于将资源分配给能使其系统吞吐量更大的用户。

$$\zeta_i = \sum_{k \in K} R_{i,u,k}^v, \quad (12)$$

对于确定接入 VLC AP 的用户,在每个用户分配单位子频带后,若根据式(3)计算的用户可达速率小于用户请求速率,而且该 VLC AP 的载波还有剩余空闲的子频带,则增加分配用户子频带数目直到满足用户请求速率为止。对于接入 VLC AP 失败的用户,则尝试接入 WiFi AP,为了有效地使用 WiFi AP 的频带资源,在一个调度周期内,WiFi AP 根据申请用户的请求速率和 WiFi 可用载波总数,采用速率比例公平法为用户分配 WiFi AP 的载波数目,如

$$\lambda_u^w = \lfloor |C| \cdot \eta_u / \sum_{u=1}^{N^w} \eta_u \rfloor, \quad (13)$$

式中 N^w 为请求接入 WiFi AP 的用户总数, $|C|$ 为 WiFi AP 可用载波数目, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示计算结果取整。

当所有申请接入 WiFi 的用户都分配载波后,将 WiFi AP 剩余载波分配给请求速率较大且载波数目小于速率需求的用户。

在算法 2 中,用户向满意度最高的 VLC 的载波发送申请,VLC AP 接纳使系统吞吐量最大的用户分配载波;同时,为降低 ICI,VLC AP 将主载波的各子频带分配给信道增益值较低的边缘用户;最后,对于申请接入 WiFi AP 的用户,本文采用用户请求速率比例公平法分配 WiFi AP 的子载波数目。

2.3 基于载波功率控制的干扰抑制算法

虽然 VLC AP 簇内的 VLC AP 之间的主载波采用 SFR 方法提高频谱利用率、系统吞吐量和抑制 ICI,由于在用户的载波分配阶段,算法激励主载波分配给 VLC AP 覆盖区的边缘用户可以抑制 ICI,提高系统吞吐和平均用户满意度,但是,若采用主载波的 VLC AP 和相邻 VLC AP 采用副载波的用户之间由于距离较近的时候,可能存在较强的同频 ICI。为此,在保证系统吞吐量的条件下,通过优化调整存在 ICI 的相邻 VLC AP 同频副载波的发射功率系数实现 ICI 的抑制。

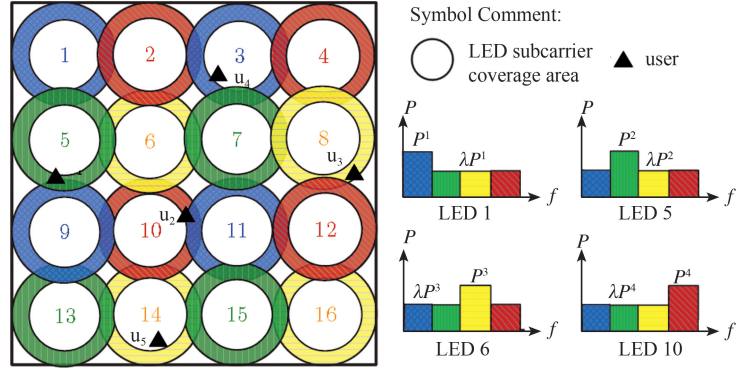


图2 基于多色载波确定的 VLC AP 簇主载波示意图

Fig. 2 Diagram of VLC AP Cluster Main Carrier Determined Based on Multi-color Carrier

算法 2 基于匹配博弈的用户载波和子频带分配算法

Alg. 2 User carrier and sub-band allocation algorithm based on matching game

输入: 用户请求速率, 请求接入 VLC 用户数 N^v , VLC AP 主载波矩阵 $\mathbf{M}$, 各 VLC AP 的副载波集合, VLC AP 数 $|I|-1$, 每色载波的子频带数目 M_c , WiFi 用户数 N^w 和载波数 $|C|$, 所有接入 VLC AP 用户使用一个子频带, 置 $\mathbf{A} = [0]$;

输出: 用户的载波和子频带分配矩阵 $\mathbf{A}$;

- (1) for $u=1 : N^v$ do
- (2) 根据式(11), 计算用户 u 使用一个子频带与 VLC AP 中各色载波的用户偏好值;
- (3) 用户 u 向用户偏好值最高的 VLC AP 的载波发送接入申请;
- (4) end for
- (5) for $m=1 : (|I|-1)$ do
- (6) 根据用户与 VLC AP m 之间的信道增益, 升序排列申请接入 VLC AP m 中的用户;
- (7) VLC AP m 使用其主载波 k_0 的一个子频带接入信道增益最低的用户, 根据式(3), 计算用户获得的可达速率;
- (8) 若可达速率小于用户请求速率, 且该主载波还有可用子频带, 则增加分配给用户的子频带数目, 直到满足用户请求速率为止; 更新用户的载波和子频带分配矩阵 $\mathbf{A}$;
- (9) 根据式(12), 计算 VLC AP m 效用函数, VLC AP m 各色副载波接纳 VLC AP 偏好值最高的最多 M_c 个用户;
- (10) 根据式(3), 计算接入 VLC AP m 副载波的用户可达速率 $\mathbf{A}$;
- (11) 若可达速率小于用户请求速率, 且该色副载波还有可用子频带, 则增加分配给用户的子频带数目, 直到满足用户请求速率为止; 更新用户的载波和子频带分配矩阵 $\mathbf{A}$;
- (12) 拒绝还未分配载波的 VLC AP m 中其他用户的接入申请;
- (13) end for
- (14) 所有未成功接入 VLC AP 的用户, 向 WiFi AP 发送接入申请;
- (15) 根据式(13), 计算 WiFi AP 分配给各请求接入用户的载波数目, 更新用户的载波分配矩阵 $\mathbf{A}$;
- (16) 若 WiFi AP 还有可用载波资源, 将 WiFi AP 剩余载波分配给请求速率较大且载波数目小于用户需求的用户;
- (17) 更新所有用户的 VLC 和 WiFi 载波分配矩阵 $\mathbf{A}$, 输出用户的载波分配矩阵 $\mathbf{A}$ 。

若 VLC AP i 分配主载波 k 给服务区的用户 u , 相邻小区 VLC AP i' 的副载波 k 因为距离邻近和副载波功率较大, 对用户 u 形成同频干扰, 为降低相邻小区 ICI, 本文设计 VLC AP i' 副载波 k 的功率控制系数为

$$\beta_{i'}^k = \begin{cases} \frac{H_{i,u}^v}{H_{i',u}^v}, & H_{i,u}^v \leq H_{i',u}^v, \\ 1, & H_{i,u}^v > H_{i',u}^v, \end{cases} \quad (14)$$

式中 $H_{i,u}^v$ 为用户 u 与其接入的 VLC AP i 的主载波 k 的信道增益, $H_{i',u}^v$ 表示用户 u 与其相邻 VLC AP i' 的副载波 k 的信道增益, 用户 u 接入的 VLC AP i 与 VLC AP i' 位置相邻。式(14)的作用是: 当用户 u 到相邻 VLC AP i' 使用副载波 k 的同频信道增益 $H_{i',u}^v$ 比用户到接纳服务小区 VLC AP i 中采用该主载波的信道增益 $H_{i,u}^v$ 更高, VLC AP i' 对该载波 k 的发射功率进行比例因子 $\beta_{i'}^k$ 限制, 以减小对相邻小区主采用主载波用户的 ICI。

为了衡量 VLC AP i' 副载波 k 的发射功率限制后, 导致其系统吞吐量损失和因减少 ICI 使相邻 VLC AP i 的吞吐量增加的情况, 定义 VLC AP i' 副载波 k 的功率控制效用值的计算方法为^[6]

$$\mu_{i'}^k = \Delta T_i - \Delta T_{i'}, \quad (15)$$

式中 $\Delta T_{i'}$ 为限制用户 u 的相邻 VLC AP i' 在副载波 k 上发射功率后导致吞吐量降低近似值, ΔT_i 为降低相邻小区 VLC AP i' 干扰后, 用户 u 对系统吞吐量的增加值, 其中 $\Delta T_{i'}$ 和 ΔT_i 的计算方法为

$$\Delta T_i = B^v \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(R_{pd}^k P_i^k H_{i,u})^2}{N_0 B^v + \sum_{j \in I, j \neq i, j \neq i'} (R_{pd}^k P_j^k H_{j,u})^2} \right) - B^v \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(R_{pd}^k P_i^k H_{i,u})^2}{N_0 B^v + \sum_{j \in I, j \neq i} (R_{pd}^k P_j^k H_{j,u})^2} \right), \quad (16)$$

$$\Delta T_{i'} = B^v \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(R_{pd}^k P_{i'}^k H_{i',u})^2}{N_0 B^v + \sum_{j \in I, j \neq i'} (R_{pd}^k P_j^k H_{j,u})^2} \right) - B^v \cdot \log_2 \left(1 + \frac{(R_{pd}^k P_{i'}^k H_{i',u})^2}{N_0 B^v + \sum_{j \in I, j \neq i} (R_{pd}^k P_j^k H_{j,u})^2} \right). \quad (17)$$

算法3 基于载波功率控制的干扰抑制算法

Alg. 3 Interference suppression algorithm based on carrier power control

输入: 各 VLC AP 的载波分配矩阵 $\mathbf{A}$, 接入 VLC 用户数 N^u , VLC AP 数 N_a

输出: 各 VLC AP 副载波的功率控制系数 β_i^k ;

-
- ```

(1) for $u=1:N^u$ do
(3) if 用户 u 采用 VLC AP i 主载波 do
(3) 将比用户 u 的 SINR 值大的相邻 VLC AP i' 的副载波 k 作为干扰载波;
(4) 由式(14)与式(15), 分别计算 VLC AP i' 的副载波功率控制系数 $\beta_{i'}^k$ 与功率控制效用 $\mu_{i'}^k$;
(5) if $\mu_{i'}^k/B^u > \epsilon$ do
(6) 将 VLC AP i' 的副载波功率乘以控制系数 $\beta_{i'}^k$, 更新用户 u 的 SINR 值;
(7) else
(8) 不调整 VLC AP i' 副载波 k 的发射功率值;
(9) end if
(10) end if
(11) end for

```
- 

算法3中,  $\epsilon$  是单位带宽  $B^u$  的功率控制阈值; 算法3将采用主载波的边缘用户所受的干扰作为优化对象, 寻找对其 SINR 值影响较大的相邻 VLC AP  $i'$  的副载波, 并计算 VLC AP  $i'$  的功率控制系数及功率控制效用值, 根据功率控制效用值确定是否采用功率系数抑制副载波的发射功率。

综上所述, MCAPC 方法的主要过程是: 根据室内 VLC AP 位置信息和用户请求, 执行算法1, 对室内布局的 VLC AP 分簇, 采用软频率复用方法, 依次确定每个 VLC AP 簇的主载波和每个 VLC AP 的主载波; 执行算法2, 采用基于匹配博弈的方法为每个用户分配载波资源; 执行算法3, 判断每个接入 VLC AP 主载波的用户受到相邻 VLC AP 副载波的单位带宽干扰是否超过阈值  $\epsilon$ , 若超过, 对邻居 VLC AP 的副载波发射最大功率进行抑制。

## 2.4 算法复杂度分析

本文提出的 MCAPC 方法中, 基于 VLC AP 多色频谱差异化的主载波确定算法的时间复杂度为  $O(N^u \times (|I|-1))$ ; 基于匹配博弈的用户载波和子频带分配算法的时间复杂度为  $O((|I|-1) \times |K| \times M_c \times N^u + |C| \times N^w)$ ; 基于功率控制的基于载波功率控制的干扰抑制算法的时间复杂度为  $O((|I|-1) \times N^u \times N^u)$ ; 因此, 本文所提 MCAPC 方法的时间复杂度为  $O((|I|-1) \times (N^u + |K| \times M_c + 1) \times N^u + |C| \times N^w)$ , 当 LED 为 4 色白光时,  $|K|=4$ 。对比算法 RAMUSD 采用了势博弈优化用户接入 AP 和功率分配因子, 若在均衡 AP 负载时可以调整 2 次接入方式, 则其复杂度为:  $O((|I|-1) \times (2N^u + |K| \times M_c + 1) \times N^u + |C| \times 2N^w)$ , 其复杂度略高于本文算法; 而采用动态功率调整的 DSINCIC 方法的时间复杂度为:  $O((|I|-1) \times (\Gamma + |K| \times M_c + 1) \times N^u + |C| \times 2N^w)$ ,  $\Gamma$  表示功率可调整值数目。

## 3 仿真及分析

### 3.1 仿真环境及评价指标

使用蒙特卡洛法对所提 MCAPC 的性能进行仿真, 用户随机分布在  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 3\text{ m}$  的房间中, 房间内的 VLC AP 的 LED 以等间隔均匀  $4 \times 4$  个放置在平顶的天花板上, WiFi AP 放置在天花板的中央, 在控制中心的每个调度周期内假定用户的位置确定, 每个 LED 灯组由红色、绿色、蓝色和黄色灯珠组成, 采用色移键控 (Color Shift Keying, CSK) 调制<sup>[3,4,14]</sup>, 4 色波长分别为 650、500、450、600 nm, 其载波  $k=1, 2, 3, 4$  分别表示, 对应的光电转换效率分别为 0.44、0.23、0.15、0.37 A/W, 每色载波划分  $M_c=5$  个频带, 综合考虑 VLC AP 覆盖范围和 ICI, 设置默认的光接收机视场角  $\phi_c=60^\circ$ , 默认用户数目 25 个, 随机分布在室内, 用户请求速率  $\eta_u \in \{20, 40, 60, 80, 100\}$ , 单位为 Mbps, 用户  $u$  的满意度由式(18)计算<sup>[9]</sup>。其他默认的仿真参数

如表 1 所示。仿真评价指标为系统吞吐量和平均用户满意度,功率调整阈值  $\epsilon$  设定为 0.04

用户  $u$  接入 VLC AP 或 WiFi AP 的满意度函数定义为<sup>[14,16]</sup>

$$S_u = \begin{cases} R_u / \eta_u, & R_u < \eta_u, \\ 1, & R_u \geq \eta_u, \end{cases} \quad (18)$$

式中  $\eta_u$  为用户  $u$  的请求速率,  $R_u$  为 VLC AP 或 WiFi AP 服务用户的可达速率,由式(3)或式(6)计算。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

| Parameter             | Meaning                                 | Value                           |
|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|
| $L \times W \times H$ | Room size                               | 10 m $\times$ 10 m $\times$ 3 m |
| $h_p$                 | Height of the receiver above the ground | 1.2 m                           |
| $P_i^k$               | Maximum power of monochrome LED         | 5 W                             |
| $B^v$                 | One subband bandwidth of VLC AP         | 10 MHz                          |
| $M_c$                 | Subcarriers for monochromatic LED       | 5                               |
| $\varphi_{1/2}$       | Half power angle of LED                 | 60°                             |
| $T(\psi)$             | Optical filtering gain of the receiver  | 1                               |
| $A_D$                 | Receiving area of the optical receiver  | 1 cm <sup>2</sup>               |
| $P_w$                 | Transmission power of WiFi AP           | 20 dBm                          |
| $B^w$                 | One carrier bandwidth of WiFi AP        | 625 KHz                         |
| $ C $                 | Number of WiFi carriers                 | 32                              |
| $\epsilon$            | Power control utility threshold         | 0.04                            |

将文中所提 MCAPC 方法与下面的 3 个方法进行对比,以验证本研究所提算法性能,第 1 对比方法是文献[16]提出的 RAMUSD 方法,该方法根据用户业务需求,采用势博弈方法调整接入多色 VLC AP 和功率因子,以均衡 AP 之间负载和避免 ICI;第 2 对比方法是文献[14]设计的一种基于动态调度的干扰管理协调(DSINCIC)的优化方法,该方法将多色 VLC 与 SFR 技术进行融合,通过动态调整主载波和副载波的发射功率及采用轮询方式分配用户的载波,实现干扰的管理;第 3 对比方法是无功率调整的联合主载波和副载波的载波分配(Joint Carrier Allocation without Power Control, JCA-no PC)方法。

### 3.2 仿真结果及分析

图 3 展示了文中所提 MCAPC、对比方法 RAMUS、DSINCIC 和 JCA-no PC 的系统吞吐量性能随用户数目的变化情况。随着用户数的增加,图 3 中 4 种方法都使 VLC-WiFi 异构网络的系统吞吐量均呈上升趋势,当用户数目增加到一定值时,系统的可用资源逐渐殆尽,系统吞吐量上升趋势最终趋于平缓。但是,在相同的用户数目下,文中所提 MCAPC 方法获得最高的系统吞吐量,这是因为研究采用基于多色载波确定 VLC AP 簇主载波和基于匹配博弈的 AP 接纳用户的载波和子频带分配算法,保证 AP 以提升吞吐量为目标给用户分配主载波或副载波;而相比于 JCA-no PC 方法,本文能够根据主载波受 ICI 干扰情况和吞吐量损失情况,调整相邻 VLC AP 副载波发送功率的控制系数,以减少 ICI 的同时,不降低系统吞吐量;而对比的 RAMUS 采用势博弈方法调整 VLC AP 接入用户数目和功率因子,但在载波分配中没有区分主副载波、所采用干扰避免的载波方法以均衡 AP 负载为目标,不能控制系统吞吐量降低;而 DSINCIC 方法虽然区分了主载波和副载波和抑制 ICI 的发射功率系数调整,但是该方法采用轮询方式分配载波,不如匹配博弈和势博弈方法在调整用户接入和载波分配中对 ICI 抑制和提高系统吞吐量贡献大;而对比的 JCA-no PC 方法虽然采用本文的主载波和副载波划分方法,并采用基于匹配博弈的载波发射功率系数控制方法,但是对相邻小区 ICI 干扰缺乏抑制手段,较大地 ICI 将抑制系统吞吐量增加速度,因而获得最低的系统吞吐量。

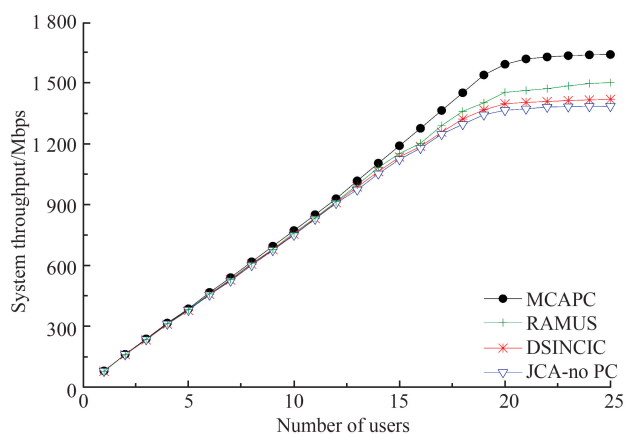


图3 不同用户数目的系统吞吐量

Fig. 3 System Throughput for Different Number of Users

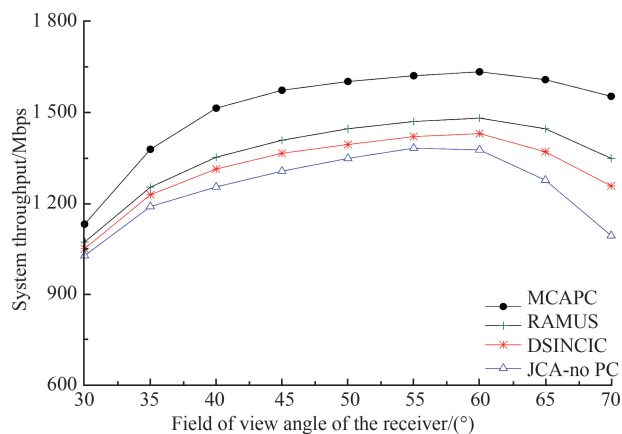


图4 不同接收机视场角的系统吞吐量

Fig. 4 System Throughput for Different Receiver Field of View Angle

图4展示了本研究所提MCAPC、对比RAMUS、DSINCIC和JCA-no PC方法的系统吞吐量随接收机视场角的变化情况。随着接收LED收机视场角的增大,用户可以申请的VLC AP数目增加,同时,相邻VLC AP的ICI也不断地增加,因此,4种方法的系统吞吐量均呈先增加后下降趋势,但本研究所提的MCAPC方法在相同视场角获得最大的系统吞吐量。原因是:当视场角较小时,通信平面上有些位置是VLC覆盖盲区,较多的用户设备无法接入VLC AP,只能接入资源较少的WiFi AP,因此,系统的吞吐量较低;随着视场角的增加,用户设备申请接入VLC AP的概率越来越大,系统吞吐量增加;但是,当视场角增加到一定值时,用户设备在一个位置接收到多个VLC AP信号,VLC AP之间越来越严重的ICI,使得系统吞吐量下降。相比JCA-no PC算法,MCAPC的系统吞吐量下降速度较为缓慢,这是因为MCAPC方法采用基于载波功率控制的干扰抑制算法,在ICI加重时可以针对不同的干扰强度灵活地调整副载波的发射功率的控制系数,从而实现对ICI的有效抑制,抑制了系统吞吐量下降的速度。而对比方法DSINCIC因为其能够动态调整主载波和副载波的功率以调整VLC AP重叠覆盖区域,降低ICI,因此表现出比JCA-no PC算法更强的抗干扰能力,但是由于其主载波和副载波的分配采用轮询分配算法,因此,功率调整的灵活性和ICI抑制效果不如MCAPC和RAMUS方法,RAMUS通过势博弈方法动态调整用户接入合适的AP、载波分配和功率因子,能抑制ICI和均衡AP负载,获得比DSINCIC更高的系统吞吐量;而JCA-no PC没有功率调整机制,ICI增加时系统吞吐量下降最快。

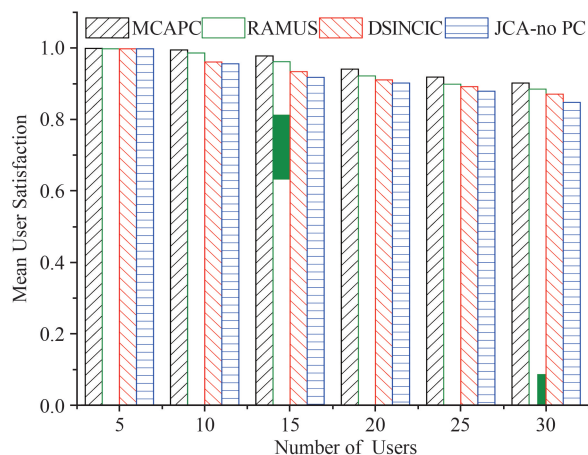


图5 不同用户数目的平均用户满意度

Fig. 5 Mean User Satisfaction with Different Numbers of Users

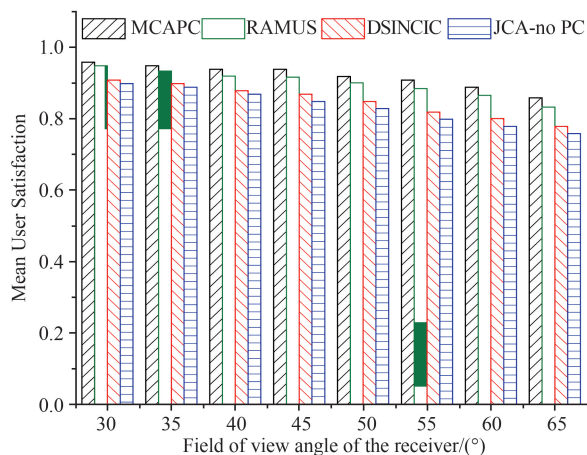


图6 不同接收机视场角的平均用户满意度

Fig. 6 Mean User Satisfaction with Different Receiver Field of View Angle

图 5 展示了当用户数目增多的时候,研究所提 MCAPC、对比 RAMUS、DSINCIC 和 JCA-no PC 的平均用户满意度都在逐渐下降,这是因为随着用户数的增加,异构网络 VLC AP 和 WiFi AP 的有限资源被使用殆尽,系统吞吐量达到容量上限,同时,由于用户接收相邻小区间的 ICI 也在不断增加,使系统吞吐量下降。但是,MCAPC 方法的平均用户满意度高于其它 3 种方法,原因是:MCAPC 方法采用 VLC AP 簇软频率复用主载波服务边缘用户,降低了相邻 VLC AP 小区用户的 ICI,采用匹配博弈的用户载波和子频带分配算法时,既保证了 VLC AP 的系统吞吐量,又考虑了用户的满意对作用用户选择载波的效用函数,提高了载波资源的利用率和用户的平均满意度。RAMUS 虽然采用势博弈方法可以调整用户接入负载均衡和提供更多资源的 AP,但是由于没有采用主、副载波区分的频率分配方法,降低了资源利用率,故其平均用户满意度低于 MCAPC 方法;而 DSINCIC 方法则采用基于贪婪算法的主副载波的确定方法以及基于轮询的用户调度,没有考虑 VLC AP 资源有限性、各色载波的光电转换系数差异导致的资源利用率差异和服务用户数目关系,限制了多色载波的资源利用率作用,所以,该方法的平均用户满意度也较低。而对比的 JCA-no PC 方法缺少功率调整策略,在用户数增多时 ICI 抑制效果下降,其平均用户满意度最低。

图 6 为当接收机视场角逐渐变大的时候,研究所提 MCAPC、对比 RAMUS、DSINCIC 和 JCA-no PC 的平均用户满意度都逐渐下降,这主要是因为随着接收视场角的增加,由于上述 4 种方法均采用一个用户最多接入一个 VLC AP 的策略,因此,虽然有更多的 VLC AP 可选,但用户最后最多选择一个 VLC AP 接入,较多候选的 VLC AP 反而增加了小区间干扰,从而导致平均用户满意度降低。但是,本文所提 MCAPC 方法的平均用户满意度高于其他 3 种对比算法,这是因为:当视场角增加导致系统的 ICI 增强时,MCAPC 方法采用了功率调整策略,通过抑制相邻小区的副载波的发射功率系数,降低 ICI 干扰,从而减少了 ICI 增加对用户的影响。对比的 JCA-no PC 方法只能依靠 VLC AP 簇主载波产生的频谱间隔隔绝 ICI,但是因为不使用功率调整策略,无法阻挡视场角增加时相邻 VLC AP 的副载波产生的 ICI,因此,平均用户满意度随着干扰增强逐渐降低。对比的 RAMUS 虽然可以调整用户接入的 AP 和功率调整降低 ICI,但是由于没有区分主载波和副载波,为避免 ICI,就降低载波资源利用率,从而降低平均用户满意度;而 DSINCIC 方法虽然能够动态调整副载波的功率以调整重叠覆盖面积以降低 ICI,但是,该方法没有考虑用户信干比差异性以及多色频谱的差异性,在分配载波资源时采用简单的轮询方法,从而使平均用户满意度低于 MCAPC。

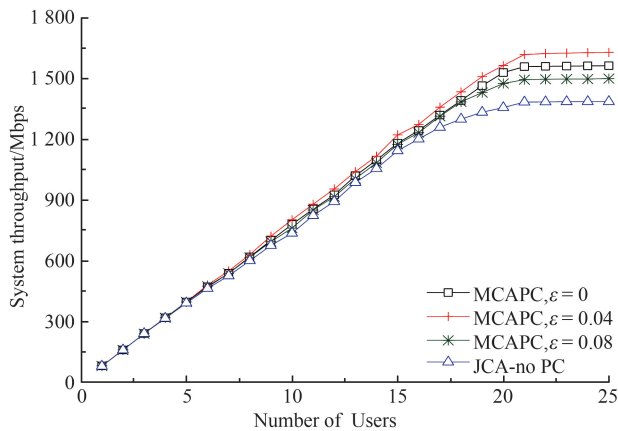


图 7 不同用户数目的系统吞吐量

Fig. 7 System Throughput for Different Number of Users

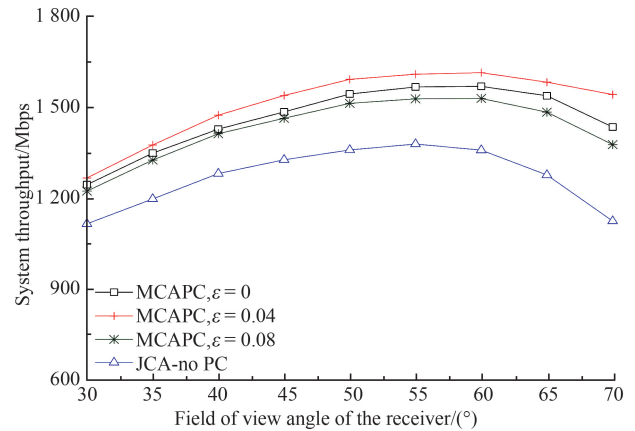


图 8 不同接收机视场角的系统吞吐量

Fig. 8 System Throughput for Different Receiver Field

图 7 和图 8 采用不同单位带宽的功率控制阈值  $\epsilon$  对于系统吞吐量造成的影响。首先,与 JCA-no PC 方法相比,能够看出采用功率调整抑制 ICI 的 MCAPC 方法,可以有效地提升系统的吞吐量。在相同的功率控制策略、阈值和视场角条件下,系统吞吐量变化趋势和原因与图 3 和图 4 的分析类似。在图 7 和图 8 中,从 3 种阈值的设定可以看出,不同阈值对吞吐量的增加程度不同,因此,过高或者过低的功率控制阈值,都会影响系统的吞吐量。当  $\epsilon$  过低时,如  $\epsilon = 0$ ,导致 MCAPC 方法触发副载波调整功率系数比较频繁,MCAPC 方法频繁检测受 ICI 影响用户的副载波功率系数,使用户的功率分配难以收敛,从而影响功率控制的效用;而当  $\epsilon$

过高时,如 $\epsilon = 0.08$ ,导致 MCAPC 方法容忍的 ICI 较大,只有当 ICI 比较大时才触发副载波的功率调整,这样导致主载波用户需要忍受较大的 ICI 导致较大的吞吐量损失和平均用户满意度的下降。

## 4 总结

为解决室内 VLC-WiFi 异构网络中多 VLC AP 密集部署产生的 ICI 问题,研究提出 MCAPC 方法降低 ICI 和提高系统吞吐量与平均用户满意度,所提方法通过基于多色载波的 VLC AP 簇主载波划分和在相同 VLC AP 簇内采用软频率复用方法,可以抑制 VLC AP 覆盖区边缘 ICI;同时,设计基于匹配博弈的用户主载波分配和抑制副载波发射功率干扰的 ICI 消除方法,以进一步提升系统吞吐量和平均用户满意度。进一步优化 VLC 多色载波和 WiFi 载波资源分配是提升室内用户体验、支持室内高速通信需求的有效方法。在后续研究中,关注用户体验质量的 VLC-WiFi 资源分配方法,降低 VLC-WiFi 网络切换对业务性能影响是值得有意义的研究方向。

## 参 考 文 献

- [1] LOPES C H D, ANDRADE T P V, SODRE A C. Implementation of a hybrid FiWi system using FSO, VLC and mm-waves toward 6G applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(24): 1403-1406.
- [2] BESJEDICA T, FERTALJ K, ZAKARIJA I. Evolution of hybrid LiFi-WiFi networks: a survey [J]. Sensors, 2023, 23(9): 4252.
- [3] LIU X, NA Z Y, DURRANI T S. Joint resource allocation for a novel OFDM-based multicolor VLC network [J]. IEEE Networking Letters, 2021, 3(3): 100-104.
- [4] XIONG J, ZHANG R X, LU L, et al. Physical-layer network coding enhanced visible light communications using RGB LEDs [J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(1): 7301010.
- [5] WU X P, SOLTANI M D, ZHOU L, et al. Hybrid LiFi and WiFi networks: a survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 13981420.
- [6] 刘焕淋, 蒲欣, 陈勇, 等. 室内 VLC-WiFi 异构网络基于动态载波分配的干扰管理策略[J]. 电子学报, 2021, 49(10): 1920-1926.
- [7] 高龙龙, 谢显中, 卢华兵. VLC 网络中兼具功率与时隙分配的自适应干扰管理机制[J]. 信号处理, 2020, 36(02): 177-187.
- [8] FENG S M, ZHANG R, LI X, et al. Dynamic throughput maximization for the user-centric visible light downlink in the face of practical considerations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5001-5015.
- [9] LIU H, PU X, CHEN Y, et al. User-centric access scheme based on interference management for indoor VLC-WIFI heterogeneous networks [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 1-12.
- [10] 白向伟, 李青, 唐燕群. 低复杂度室内超密集可见光通信网络频谱资源分配算法[J]. 光学学报, 2019, 39(09): 100-109.
- [11] IBRAHIM A, ISMAIL T, ELSAYED K F, et al. Resource allocation and interference management techniques for OFDM-based VLC attocells [J]. IEEE Access, 2020, 8: 127431-127439.
- [12] MATTER K M, FAYED H A, ALY M H. Enhanced bit error rate in visible light communication: a new LED hexagonal array distribution [J]. Optical and Quantum Electronics, 2022, 54(8): 506.
- [13] WU X, BRIEN D C O. Parallel transmission LiFi [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(10): 6268-6276.
- [14] ZHOU K, GONG C, XU Z. Color planning and intercell interference coordination for multicolor visible light communication networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(22): 4980-4993.
- [15] JIANG R, HAAS H, WANG Z C, et al. Joint user association and power allocation for cell-free visible light communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36, (1): 136-148.
- [16] LIU H L, YANG S, CHEN H N, et al. Resource allocation based on differentiated user services for indoor hybrid multi-color VLC/WiFi networks [J]. Optics Communications, 2023, 530: 129072.
- [17] 曲桦, 宋亚兰, 赵季红. 基于 TG-PF 的 LTE-A 中继蜂窝网络下行分层调度方法[J]. 通信学报, 2013, 34(12): 113-119.
- [18] 陈勇, 吴志倩, 刘焕淋, 等. 基于神经网络的可见光通信系统信道估计方法[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0706004.
- [19] ABOAGYE S, NGATCHED T M N, DOBRE O A. Subchannel and power allocation in downlink VLC under different system configurations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(5): 3179-3191.

(责任编辑:赵海军)