

室内 VLC-WiFi 异构网络基于动态载波分配的 干扰管理策略

刘焕淋¹, 蒲 欣¹, 陈 勇², 黄美娜¹, 陈金林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: 为了有效地管理 VLC-WiFi 异构网络的小区间干扰, 该文设计基于用户中心接入的动态载波分配 (DCAUCA) 方法, 该方法依据用户请求速率构建大小不同的 multi-AP 小区, 对各 multi-AP 小区依据用户请求速率与网络服务速率的差值降序排列, 并依次为各 multi-AP 小区的 VLC AP 分配载波. 同时, 提出基于 VLC AP 发射功率控制的小区残余干扰抑制 (RISPC) 策略以进一步优化干扰管理效果. 仿真结果表明, DCAUCA 方法相较于对比方法最高可提升 52.15% 的系统吞吐量与 7.10% 的用户满意度, RISPC 策略相较于 DCAUCA 方法最高可提升 9.66% 的系统吞吐量.

关键词: VLC-WiFi 异构网络; 小区间干扰; 动态载波分配; 干扰管理; 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)10-1920-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20210072

Interference Management Strategy Based on Dynamic Carrier Allocation for Indoor VLC-WiFi Heterogeneous Network

LIU Huan-lin¹, PU Xin¹, CHEN Yong², HUANG Mei-na¹, CHEN Jin-lin¹

(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: In order to manage the inter-cell interference of the visible light communication-wireless fidelity (VLC-WiFi) heterogeneous network effectively, a dynamic carrier allocation method based on user centric access (DCAUCA) was designed in this paper, in which multi-AP cells were constructed for users according to user rates and the differences between user request rate and network service rate of each cell was sorted in descending order for the purpose of allocating carriers to each VLC AP sequentially. Furthermore, a strategy called residual interference suppression based on transmitting power control (RISPC) was proposed to further suppress residual interference. Simulation results show that, compared with the comparison method, the DCAUCA improves system throughput by up to 52.15% and user's satisfaction by up to 7.10%. Compared with DCAUCA, the RISPC improves system throughput by up to 9.66%.

Key words: VLC-WiFi heterogeneous network; inter-cell interference; dynamic carrier allocation; interference management; system throughput

1 引言

近年来, 物联网的迅速发展使无线网络流量和带宽需求快速上升^[1]. 随着无线多媒体业务的不断激增, 频谱资源日益稀缺, 仅靠传统基于射频通信的多址技术愈发难以满足多用户接入^[2]. 基于发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 的可见光通信 (Visible Light Communication, VLC) 技术应运而生, 其拥有广阔的可见光

谱资源, 且 LED 布设方便、绿色无辐射, 有望成为下一代最具潜力的无线通信技术^[3]. 异构无线通信网络的互联互通是目前业界关注的焦点, 目的在于充分利用目前存在的各种无线网络^[4], 使用户不用更换设备就能够接入各种异构无线接入网络, 实现便捷通信. VLC 与射频通信技术互补形成的 VLC-无线保真 (Wireless Fidelity, WiFi) 异构网络能够为室内用户提供高速、绿

色、可靠的通信服务^[5]. 为了满足通信全覆盖, VLC 接入点 (Access Point, AP) 通常部署密集, 导致不同 VLC AP 小区之间出现交叉重叠覆盖, 共享频谱时产生小区间干扰 (Inter Cell Interference, ICI)^[5,6]. ICI 严重影响网络性能, 因此在设计接入策略和资源分配时必须考虑 ICI 干扰管理, 干扰管理的方法主要包括干扰消除和干扰抑制.

由于干扰消除方法常常需要复杂的信号处理过程及高昂的接收装置^[6,7], 这对于高速 VLC 系统不完全适用. 设计信号处理简单的干扰抑制是解决高速通信 ICI 的有效手段. 文献[8]设置抗干扰系数评估用户质量, 构建信息矩阵用于评估 AP 质量, 并基于万有引力定理设计用户与 AP 的双向关联准则抑制干扰, 该关联决策依赖于庞大的数值计算. 文献[9]提出一种动态集群调度算法在时域抑制 ICI, 然而调度优先级设置的不合理很容易造成个别用户体验较差. 文献[10]采用功率控制的方式减轻异构网络中不同蜂窝小区之间的干扰, 但发射功率的降低会导致用户速率普遍偏低, 影响整体吞吐量. 文献[11]基于干扰图采用改进的禁忌搜索算法寻找动态频率复用的组合, 能在频域抑制 ICI 和提升系统吞吐量, 但动态搜索的算法复杂度较高.

文献[12]采用基于用户中心接入的频分复用 (Frequency Division Multiplexing based on User Centric Access, FDMUCA) 方法, 通过固定阈值判定用户与 AP 之间的关联准则, 并借助经典图着色算法对 AP 分配频谱. 文献[13]提出基于用户中心接入的静态频谱分配 (User Centric Access based on Regular Spectrum Allocation, UCARSA) 方法, 对多用户-多 AP 的关联策略改进创新, 并将均匀划分的 VLC 频谱块交叉分配给相邻 VLC AP 以达到抑制 ICI 的目的, 但频谱分配的灵活性有待提高.

本文针对多用户-多 AP 关联以及 ICI 抑制问题提出基于用户中心接入的动态载波分配 (Dynamic Carrier Allocation based on User Centric Access, DCAUCA) 方法, 在满足不同用户请求速率的同时提升系统吞吐量. 针对载波复用造成的残余 ICI 问题, 本文进一步提出基于功率控制的残余干扰抑制 (Residual Interference Suppression based on Power Control, RISPC) 策略以最大程度地抑制 ICI.

2 室内 VLC-WiFi 异构网络

室内 VLC-WiFi 异构网络模型如图 1 所示, 16 个 VLC AP 以阵列形式部署在天花板上, 负责下行数据传输. WiFi AP 位于天花板中央, 负责上行数据传输以及部分下行数据传输. 接收端配有光电探测器 (Photo-

electric Detector, PD). VLC AP 以电力线通信的方式连接到控制器^[14]. 控制器记录用户信道状态信息、AP 编号及用户编号、资源的使用状况等, 同时监控用户位置, 记录 AP 负载, 评估用户接收信噪比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR), 执行用户关联及资源分配算法.

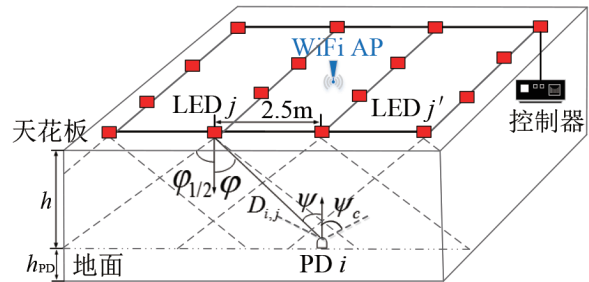


图 1 室内 VLC-WiFi 异构网络模型

如图 1 所示, 作为 VLC AP 的 LED 是朗伯辐射的点光源, LED 主要依靠视距链路传输数据, LED j 到 PD i 的视距链路信道增益 $H_{i,j}^V$ 表示为^[10,15]

$$H_{i,j}^V = \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi D_{i,j}^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) g(\psi) T(\psi) \quad (1)$$

式(1)中, A_{PD} 表示光接收机的接收面积; 朗伯辐射系数 $m = -\ln 2 / \ln[\cos(\varphi_{1/2})]$, 其中 $\varphi_{1/2}$ 表示发射机的半功率角; φ 为发射机的发射角; ψ 为接收机的入射角; 接收器的光滤波增益和光聚合增益分别为 $T(\psi)$ 和 $g(\psi)$. 若 $0 \leq \psi \leq \psi_c$, 聚光器增益 $g(\psi) = n^2 / \sin^2(\psi_c)$, ψ_c 为接收机的视场角, 墙壁反射系数 $n = 1.5$; 若 $\psi > \psi_c$, $g(\psi) = 0$.

VLC AP j 服务用户 i 的 SINR 的计算方法为

$$\zeta_{i,j}^V = \frac{(\gamma P_j^V H_{i,j}^V)^2}{N^V B_j^V + \sum_{k \in A, k \neq j} (\gamma P_k^V H_{i,k}^V)^2} \quad (2)$$

式(2)中, γ 为光电转换系数; P_j^V 为 VLC AP j 的光发射功率; N^V 为 VLC 噪声功率谱密度, 其取值为 1×10^{-21} ; B_j^V 为 VLC AP j 的通信带宽; A 为 VLC AP 集合. VLC AP j 服务用户 i 的最高可达速率由 $R_{i,j}^V = B_j^V \log(1 + \zeta_{i,j}^V)$ 计算.

工作频率在 2.4 GHz 的 WiFi 技术采用 IEEE 802.11 体系修正的信道传播模型. WiFi AP j 到用户 i 的信道增益 $H_{i,j}^W$ 表示为^[6,15]

$$H_{i,j}^W = |H_0|^2 \times 10^{\frac{-L(d_i) + X_\sigma}{10}} \quad (3)$$

式(3)中, H_0 表示信道传递函数, 服从标准瑞利分布; 阴影衰落 X_σ 是零均值高斯随机变量, 标准偏差为 10 dB; $L(d_i)$ 表示自由空间路径损耗; d_i 为 WiFi AP 到用户 i 的通信链路长度.

WiFi 用户不受到 ICI 影响, 因此 WiFi AP j 服务用户

i 的 SINR 计算方法为

$$\xi_{i,j}^W = \frac{P^W H_{i,j}^W}{N^W B^W} \quad (4)$$

式(4)中, P^W 为 WiFi AP 的电发射功率; N^W 为 WiFi 背景噪声功率, 取值为 -86 dBm; B^W 为 WiFi 通信带宽. WiFi AP $_j$ 服务用户 i 的最高可达速率由 $R_{i,j}^W = B^W \log(1 + \xi_{i,j}^W)$ 计算.

本文采用多 AP (multi-AP) 小区服务用户的模式^[12,13], 对用户关联策略进行创新, 即设计基于 multi-AP 小区的用户关联策略以进一步提升用户体验. VLC AP 的密集部署会导致各 VLC AP 的小区间干扰问题发生. 本文从干扰抑制的角度考虑干扰管理, 即设计基于用户中心接入的动态载波分配 (DCAUCA) 方法, 使相邻的 VLC AP 分别采用相互正交的子载波对各自的关联用户提供服务, 位置相距较远的 VLC AP 可以复用载波. 针对载波复用带来的残余 ICI, 本文通过衡量干扰 VLC AP 造成的系统吞吐量损失, 巧妙地限制对吞吐量造成较大损失的干扰 VLC AP 的发射功率以达到抑制残余干扰的目的, 即提出基于功率控制的残余干扰抑制 (RISPC) 策略.

3 室内 VLC-WiFi 异构网络

3.1 基于 multi-AP 小区的用户关联

在用户关联阶段, 设计用户与 AP 之间的关联准则, 限制用户关联的 multi-AP 小区所含 VLC AP 数目以优化全局资源分配. 用户 i 的 multi-AP 小区所含 VLC AP 数目 s_i 为

$$s_i = \min \left\{ \frac{r_i}{\delta}, |D_i| \right\} \quad (5)$$

其中, 常量 $\delta = 20$ Mbps; r_i 为用户 i 的请求速率; D_i 为覆盖用户 i 的 VLC AP 集合, $|D_i|$ 为集合 D_i 中元素的个数.

在构建 multi-AP 小区之前, 用户期望接入传输质量更优的网络, 即选择提供更高 SINR 的 AP. 文献^[16]以达到相同的信道容量为转换条件, 将 VLC 的 SINR 转换为接入 WiFi AP 达到相同速率所需的等效 SINR, 从而比较 VLC SINR 与 WiFi SINR 值的低高.

基于 multi-AP 小区的用户关联策略步骤见算法 1. 其中, N_u 为用户数目; N_{ap} 为 AP 数目; i 为用户编号; j 为 AP 编号, $j = N_{ap}$ 表示 AP $_j$ 的类型为 WiFi AP; 用户-AP 关联结果记录于矩阵 M 中, $m_{i,j} = 1$ 表示用户 i 与 AP $_j$ 关联; G 为 VLC 网络的用户集合.

3.2 基于用户中心接入的动态载波分配

VLC 系统带宽 B^V 通常由 N 个带宽为 B_0 的相互正交子载波构成. ICI 发生在 VLC 系统中, 因此, DCAUCA 将

算法 1 基于 multi-AP 小区的用户关联

输入: N_u, N_{ap} , VLC 系统带宽、WiFi 系统带宽、VLC 噪声功率、WiFi 噪声功率、AP 与用户的位置坐标、用户接受视场角、PD 接收面积、LED 半功率角

输出: 用户-AP 关联矩阵 M

步骤 1: 由式(2)和式(4)计算所有用户的 SINR 值, 并转换等效 SINR 值, $M = \{0\}, D_i = \emptyset, G = \emptyset$.

步骤 2: 轮询所有用户, 将 $\xi_{i,j}^V > 0$ 的 VLC AP 编号 j 记入集合 D_i .

步骤 3: 轮询所有用户, 找到最大转换 SINR 值对应的 VLC AP 编号 j , 判断 j 是否为 WiFi AP 的编号 $N_{ap} + 1$. 若是, 当前用户 i 关联 WiFi AP, 即 $m_{i,j} \leftarrow 1$; 否则, 当前用户编号 i 记入集合 G .

步骤 4: 轮询集合 G 中的所有用户编号, 由式(6)计算 s_i , 为用户 i 关联 SINR 值更高的 s_i 个 VLC AP $_j$, 即 $m_{i,j} \leftarrow 1$.

步骤 5: 检测是否有新用户请求接入网络. 若是, 更新 N_u , 返回步骤 1; 否则, 转步骤 6.

步骤 6: 轮询所有用户, 判断用户 i 的接收 SINR 是否发生改变. 若是, 返回步骤 1; 否则, 等待当前调度周期结束.

N 个子载波按需分配给 VLC AP, 并尽量避免 ICI 发生. DCAUCA 方法步骤见算法 2. 各 VLC AP 的载波分配结果记录在矩阵 F 中, $f_{j,d} = 1$ 表示 VLC AP $_j$ 已被分配编号为 d 的子载波.

算法 2 基于用户中心接入的动态载波分配 (DCAUCA)

输入: $\{r_1, r_2, \dots, r_{N_u}\}$

输出: VLC AP 的载波分配标记矩阵 F

步骤 1: 执行算法 1, $F = \{0\}$.

步骤 2: 轮询所有用户, 将用户 i 的所有关联 AP 编号 j 记入集合 A_i .

步骤 3: 轮询所有用户, 由式(6)计算 η_i .

步骤 4: 统计所有 VLC AP 的负载 L_j .

步骤 5: 初始化子载波集合 $C = \{1, 2, \dots, N\}$, 并选择当前最高 η_i 值对应的集合 A_i , 依次检查 A_i 所含的 VLC AP 是否已被分配载波. 若是, 从 A_i 中删除对应的 VLC AP 编号, 并从 C 中删除对应的载波编号, 转步骤 6; 否则, 转步骤 6.

步骤 6: 轮询集合 A_i 中的所有 VLC AP 编号, 由式(7)计算 B_j .

步骤 7: 取集合 C 中第一个子载波编号.

步骤 8: 判断当前的子载波编号 c 是否已被分配给 VLC AP $_j$ 的上、下、左、右及对角位置的 VLC APs. 若是, 转步骤 9; 否则, 将子载波 c 分配给 VLC AP $_j$, 即 $f_{j,c} \leftarrow 1$, 并将子载波 c 从 C 中删除, 转步骤 9.

步骤 9: 检查 VLC AP $_j$ 已被分配的子载波数目是否等于 B_j . 若是, 将编号 j 从 A_i 中删除, $\eta_i \leftarrow -\infty$, 转步骤 11; 否则, 转步骤 10.

步骤 10: 判断当前载波编号 c 是否为集合 C 中的最后一个编号. 若是, 将编号 j 从 A_i 中删除, $\eta_i \leftarrow -\infty$, 转步骤 11; 否则, 取集合 C 中编号大于 c 的下一个子载波, 返回步骤 8.

步骤 11: 判断 A_i 是否为空集. 若是, 返回步骤 5; 否则, 返回步骤 6.

依据用户请求速率与网络服务速率的差值对不同用户的 multi-AP 小区设置优先级. multi-AP 小区优先级定义为

$$\eta_i = r_i - \sum_{j \in A_i} B_0 \log \left(1 + \frac{(\gamma P_j^V H_{i,j}^V)^2}{N^V B_0} \right) \quad (6)$$

式(6)中, r_i 为用户的请求速率; A_i 表示用户 i 的关联 VLC AP 集合. η_i 值越大表示用户 i 的请求速率越难得到满足, 越需要为用户 i 的关联 VLC AP 优先分配载波. 将各用户的 multi-AP 小区按照 η_i 值由大到小的顺序排列, 并按照该顺序为各 multi-AP 小区包含的 VLC AP 分配载波, 顺序越靠前的 VLC AP 越容易得到满足其负载需求的子载波数目.

VLC AP j 的负载 $L_j = \sum_{i \in U_j} r_i$, U_j 为 VLC AP j 关联用户集合. 依据单个 VLC AP 负载在 multi-AP 小区负载中所占比例按需分配载波, VLC AP j 所需子载波数目 B_j 由式(7)计算. 其中, C 为 VLC AP 可用子载波集合; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为计算结果向下取整.

$$B_j = \left\lfloor |C| \cdot \frac{L_j}{\sum_{k \in A_i} L_k} \right\rfloor \quad (7)$$

3.3 基于功率控制的残余干扰抑制

针对 DCAUCA 载波复用带来的残余 ICI, RISPC 方法通过限制干扰 VLC AP 的发射功率来降低其对相邻小区关联用户的干扰. 定义 VLC AP j 的发射功率控制系数 β_j 为

$$\beta_j = \begin{cases} \frac{H_{i,j}^V}{H_{i',j}^V}, & H_{i,j}^V \leq \max \{H_{k,j}^V\}, k \in U_j \\ 0, & H_{i,j}^V > \max \{H_{k,j}^V\}, k \in U_j \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, U_j 为 VLC AP j 关联用户集合; 用户 i 受到 VLC AP j 的干扰. 如果 VLC AP j 到用户 i 的信道增益大于 VLC AP j 的所有关联用户信道增益的最大值, 则休眠 VLC AP j ; 否则, 令 VLC AP j 关联用户中信道增益仅高于 $H_{i,j}^V$ 的用户编号为 i' , 降低 VLC AP j 发射功率, 减小其对用户 i 干扰.

在不损害系统吞吐量的前提下, 限制某些 VLC AP 的发射功率可以抑制 ICI. 为了衡量限制 VLC AP 发射功率导致的小区吞吐量损失和小区外用户的无干扰收益, 定义式(9)为 VLC AP j 的功率控制效用. 当对用户 i 产生干扰的 VLC AP j 发射功率受限时, 用户 i 获得的速率提升为 ΔT_i , 而 VLC AP j 小区吞吐量降低为 ΔT_j .

$$\mu_j = \Delta T_i - \Delta T_j \quad (9)$$

RISPC 策略步骤见算法 3. 其中, t 是干扰容忍次数; 设置最大干扰容忍次数 t_0 , 避免针对某用户的残余干扰抑制决策陷入死循环; ε 为功率控制效用阈值.

算法 3 基于功率控制的残余干扰抑制(RISPC)

输入: $\{D_1, D_2, \dots, D_{N_u}\}$

输出: 各 VLC AP 的功率控制系数集合 β

步骤 1: 执行算法 2, 初始化集合 β 的所有元素为 1.

步骤 2: 用户集合中取一个用户 $i, t \leftarrow 0$.

步骤 3: 检查 D_i 中的不同 VLC AP 是否被分配相同的载波编号 c . 若是, 用户 i 受到残余干扰, 转步骤 4; 否则, 转步骤 7.

步骤 4: 被分配载波 c 的用户 i 的关联 VLC AP 编号为 j , 用户 i 的非关联 VLC AP 编号为 j' , 由式(8)计算 β_j , 由式(9)计算 μ_j .

步骤 5: 判断 $\mu_j > \varepsilon$ 是否成立. 若是, 更新用户 i 的 SINR 值, 转步骤

3; 否则, $\beta_j \leftarrow 1, t \leftarrow t+1$, 转步骤 6.

步骤 6: 判断 $t < t_0$ 是否成立. 若是, 转步骤 3; 否则, 转步骤 7.

步骤 7: 判断所有用户是否被轮询. 若是, 结束流程; 否则, 转步骤 2.

4 仿真及分析

4.1 仿真环境

为了评估所提算法的系统吞吐量和用户满意度^[15]性能, 仿真参数如表 1 所示. 异构网络中用户的最高可达速率为其关联的所有 WiFi/VLC AP 的通信速率总和. 用户请求速率 $r_i \in \{20, 40, 60, 80, 100\}$, 单位为 Mbps. 为了验证本文所提方法的有效性, 选择 FDMUCA^[12]与 UCARSA^[13]作为对比方法.

表 1 仿真参数

参数	含义	数值
$L \times W \times H$	房间大小	$10 \times 10 \times 3 \text{m}^3$
h_{PD}	PD 的高度	1.2m
P_j^V	VLC AP j 的发射功率	10W
B^V	VLC 系统带宽	40MHz
B_0	VLC 子载波带宽	1MHz
N	VLC 子载波数目	40
N_{ap}	VLC AP 总数目	16
$\varphi_{1/2}$	发射机的半功率角	60°
$T(\psi)$	光滤波增益	1
A_{PD}	PD 的接收面积	1cm^2
γ	光电转换系数	0.53A/W
P^W	WiFi AP 的发射功率	20dBm
B^W	WiFi 系统带宽	22MHz

4.2 仿真结果及分析

图 2 反映 DCAUCA、UCARSA、FDMUCA 的系统吞吐量性能随用户数目的变化情况. 3 种方法的系统吞吐量均呈上升趋势, 并最终趋于平缓. DCAUCA 的吞吐量最高可达 3426.28 Mbps. 因为它依据各 VLC AP 的实际负载需求分配对应的子载波个数, 且信道条件较好的 VLC AP 优先获得足够数量的子载波, 系统带宽在全局范围内的分配更加合理. 当用户数目为 25 时, DCAUCA 的吞吐量性能比 UCARSA 提升 25.63%, 比 FDMUCA 提升 52.13%.

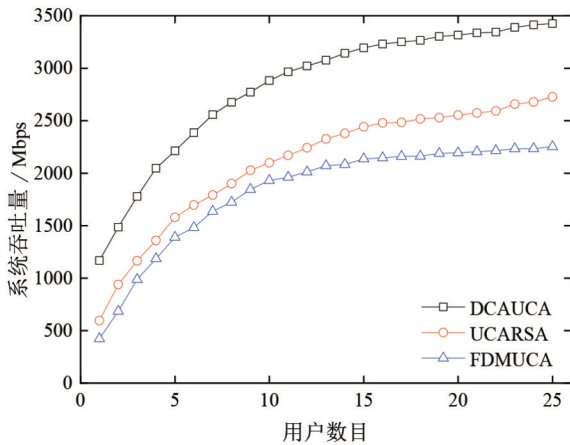


图2 不同用户数目的系统吞吐量, $\psi_c = 60^\circ$

图3反映DCAUCA、UCARSA、FDMUCA的系统吞吐量性能随接收机视场角的变化情况. 以 $\psi_c = 45^\circ$ 为分界, ψ_c 持续减小意味着可供用户接入的VLC AP数目受限, ψ_c 持续增大意味着系统的干扰增强. UCARSA基于静态频谱分配设计用户关联策略, 其吞吐量始终随 ψ_c 增加而降低. 当 ψ_c 持续增大, 基于用户关联结果执行频谱分配的吞吐量随 ψ_c 变化的趋势是先上升后下降, 而DCAUCA的吞吐量相较于FDMUCA并未受到过多损失. 这是因为DCAUCA采用更精细度的频谱划分和灵活的子载波分配使干扰抑制效果更佳, 尤其是在系统极易受到干扰的时候.

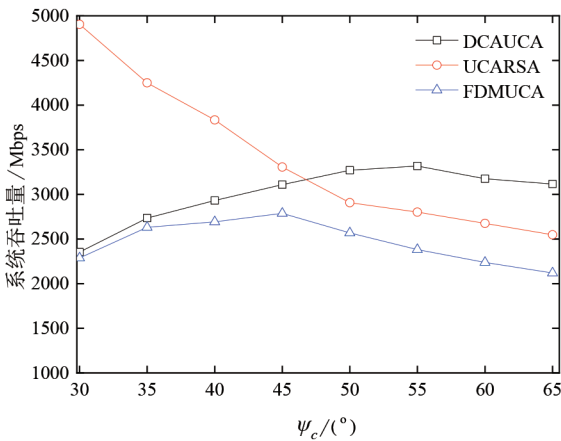


图3 不同接收机视场角的系统吞吐量, $N_u = 25$

图4展示当用户数目增多的时候, 平均用户满意度逐渐下降. DCAUCA的平均用户满意度高于2种对比方法, 因为DCAUCA依据用户的请求速率来为用户选择最适合的multi-AP小区大小. UCARSA根据固定阈值设置multi-AP小区的大小, FDMUCA依靠固定阈值决策用户与AP之间是否关联, 没有对用户请求速率的差异化现象做出考虑. 当用户数目为25时, DCAUCA的用户满意度性能比UCARSA提升1.86%, 比FDMUCA提升7.10%.

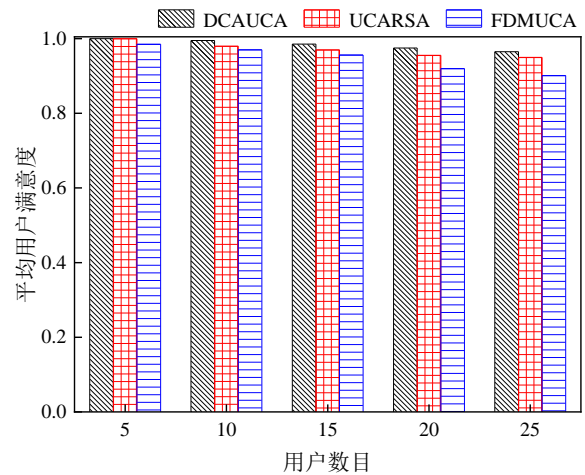


图4 不同用户数目的平均用户满意度, $\psi_c = 60^\circ$

图5反映平均用户满意度随着 ψ_c 增大而逐渐上升, DCAUCA的平均用户满意度高于2种对比方法. 当干扰增强时, DCAUCA衡量用户请求速率与multi-AP小区服务速率的差值, 按照差值由高到低的顺序为各multi-AP小区包含的VLC AP分配载波. 差值高的VLC AP优先获得无干扰载波; 差值低的VLC AP虽然可能无法获得最佳的无干扰载波, 但是多AP共同服务用户的模式弥补了载波分配顺序靠后的不足, 使用户的请求速率普遍得到满足. UCARSA未能做到协调用户速率需求的动态频谱分配, FDMUCA基于干扰图着色的静态频谱分配也没有敏锐地捕捉到用户请求速率的差异, 因而用户满意度较差. 然而, 随着 ψ_c 增大, 2种对比方法在满意度方面相较于DCAUCA的差距在逐渐缩小. 当 ψ_c 较小时, 处于边缘区域的用户会由于关联不到高质量VLC AP而满意度极低; 当 ψ_c 增大时, 边缘用户能关联到多个VLC AP, 干扰管理策略开始生效, 能提高边缘用户速率.

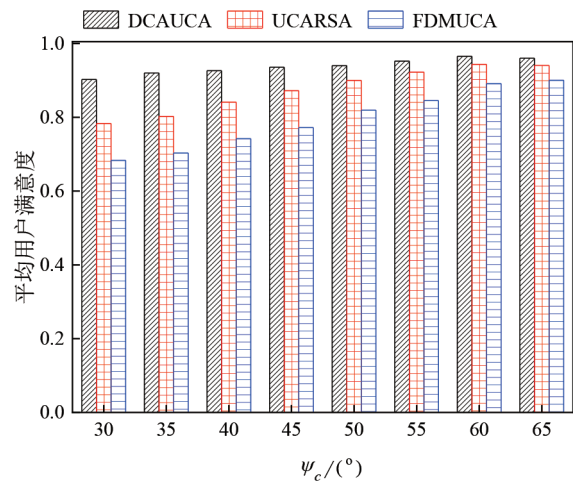


图5 不同接收机视场角的平均用户满意度, $N_u = 25$

图 6 和图 7 展示 DCAUCA 和 RISPC 在不同功率控制阈值下的系统吞吐量性能. 不同阈值对于吞吐量的提升效果不同. 其中, $\varepsilon = 0.04$ 时的吞吐量最高可达 3757.45 Mbps, 此时 RISPC 的吞吐量性能比 DCAUCA 提升最高约 9.66%; ε 值过低 ($\varepsilon = 0$) 则触发功率控制操作的概率较高, 导致某些对于性能提升贡献不大的 VLC AP 限制发射功率, 进而影响其他原本可以提供更高性能增益的 VLC AP 的功率控制效用; ε 值过高 ($\varepsilon = 0.08$) 则触发功率控制操作的条件更为严苛, 导致某些 VLC AP 放弃限制发射功率, 浪费残余干扰抑制的机会.

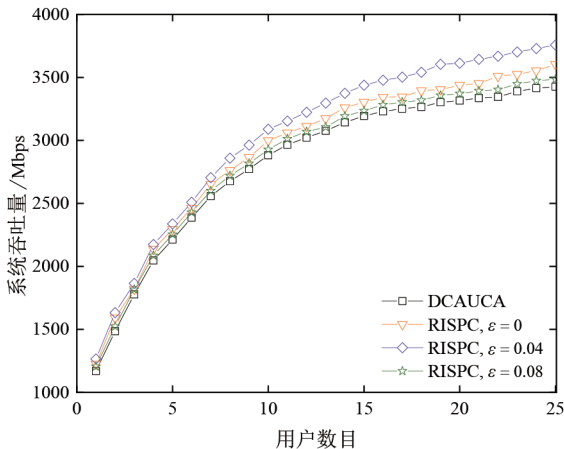


图 6 不同用户数目下本文算法的吞吐量对比, $\psi_r = 60^\circ$

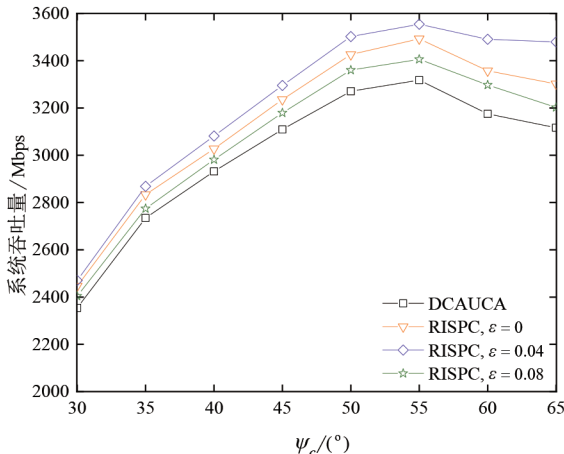


图 7 不同接收机视场角下本文算法的吞吐量对比, $N_u = 25$

5 总结

为了降低室内 VLC-WiFi 异构网络中多 VLC AP 密集部署产生的 ICI 问题, 本文提出基于用户中心接入的动态载波分配方法以最大程度地抑制干扰. 另外, 本文提出的基于 VLC AP 发射功率系数控制的小区残余干扰抑制策略, 在增加系统吞吐量的同时提高了用户满意度.

参考文献

- [1] Marshoud H, Muhsen S, Sofotasios P C, et al. Optical non-orthogonal multiple access for visible light communication[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(2): 82 – 88.
- [2] 陈崇学, 杨翼豪, 李方伟. 基于扩频通信的伪随机码时间反演多址通信[J]. 重庆邮电大学学报, 2020, 32(2): 248 – 254.
Chen S X, Yang Y H, Li F W. Pseudo-noise code time-reversal division multiple access communication based on spread spectrum communication[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020, 32(2): 248 – 254. (in Chinese)
- [3] 叶崇光, 冯人海, 毛陆虹. 采用 ACO-OFDM 调制新型可见光-射频识别标签系统[J]. 重庆邮电大学学报, 2019, 31(1): 72 – 79.
Ye C G, Feng R H, Mao L H. New kind of visible light-RFID with ACO-OFDM modulation[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019, 31(1): 72 – 79. (in Chinese)
- [4] 彭木根, 王文博, 张倩倩, 等. 异构无线通信系统的协同分集性能研究[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 21 – 25.
Peng M G, Wang W B, Zhang Q Q, et al. Performance investigation of cooperative diversity in heterogeneous wireless communication systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1): 21 – 25.
- [5] Wu X P, Chen C, Haas H. Mobility management for hybrid LiFi and WiFi networks in the presence of light-path blockage[A]. The 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) [C]. Chicago, USA: IEEE, 2019. 1 – 5.
- [6] Adnan-Qidan A, Céspedes M M, Armada G A. User-centric blind interference alignment design for visible light communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 21220 – 21234.
- [7] Huang X, Yang F, Pan C Y, et al. Pre-distorted enhanced ADO-OFDM for hybrid VLC networks: a mutual-interference-free approach[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1 – 12.
- [8] 刘焕淋, 吴兰, 陈勇, 等. 基于 QoS 决策的异构 VLC/WiFi 网络联合收发端需求的接入点选择[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 1 – 10.
Liu H L, Wu L, Chen Y, et al. QoS-based decision making access point selection under joint demands of transmitting and receiving in heterogeneous VLC/WiFi networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 1 – 10. (in Chinese)
- [9] Feng S M, Zhang R, Li X, et al. Dynamic throughput maxi-

mization for the user-centric visible light downlink in the face of practical considerations[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5001 – 5015.

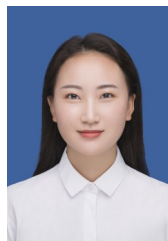
- [10] Zhou T Q, Liu Z X, Zhao J H, et al. Joint user association and power control for load balancing in downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2582 – 2593.
- [11] Chen Y, Li S J, Liu H L. Dynamic frequency reuse based on improved tabu search in multi-user visible light communication networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35173 – 35183.
- [12] Feng S M, Zhang R, Xu W, et al. Multiple access design for ultra-dense VLC networks: orthogonal vs non-orthogonal[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(3): 2218 – 2232.
- [13] Liu H L, 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.
- [14] Liu H L, Zhu P X, Chen Y, et al. Power allocation for downlink hybrid power line and visible light communication system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 24145 – 24152.
- [15] 尹浩浩, 董雨晴, 邹倩, 等. 移动场景下一种可见光通信系统的设计与实现[J]. 重庆邮电大学学报, 2017, 29(4): 487 – 493.
Yin H H, Dong Y Q, Zou Q, et al. Design and implementation of a visible light communication[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications. 2017, 29(4): 487 – 493. (in Chinese)
- [16] 郑浩天, 季新生, 黄开枝, 等. 基于等效 SINR 的 VLC 与 WiFi 垂直切换算法[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(3): 832 – 835.
Zheng H T, Ji X S, Huang K Z, et al. Novel vertical hand-off algorithm based on equivalent SINR between VLC and WiFi[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 832 – 835. (in Chinese)

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



蒲 欣 女, 1995年生, 宁夏固原人. 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.

E-mail: 727206138@qq.com



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.



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.



陈金林 男, 1996年生, 江西鹰潭人. 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.