

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

刘焕淋^{1*}, 吴兰¹, 陈勇², 蒲欣¹, 林振宇¹

¹重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

²重庆邮电大学工业物联网与网络化控制教育部重点实验室, 重庆 400065

摘要 针对可见光通信(VLC)下行链路存在多接入点(AP)重叠覆盖、VLC AP 光路易被遮挡和干扰的问题,提出了一种基于服务质量(QoS)决策的异构 VLC/无线保真(WiFi)网络联合收发端需求的接入点选择算法。该算法在收端为用户建立面向 QoS 的加权信息矩阵,为用户偏好提供高信干噪比、高接收功率、低负载、低历史中断概率的 VLC AP;在发端为 VLC AP 偏好选择抗干扰性强的用户服务。基于引力理论改进收发端选择权重值,优化用户的 AP 接入决策。仿真结果表明:该算法在方形均匀布局和混合圆方形布局中比现有算法的吞吐量分别增大了 77.3%和 11.4%,业务公平性分别减小了 53.1%和 41.1%。

关键词 光通信;可见光通信/无线保真网络;引力理论;接入点选择;吞吐量

中图分类号 TN911.74

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0806002

QoS-Based Decision-Making Access-Point Selection Under Joint Demands of Transmitting and Receiving in Heterogeneous VLC/WiFi Networks

Liu Huanlin^{1*}, Wu Lan¹, Chen Yong², Pu Xin¹, Lin Zhenyu¹

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

²Key Laboratory of Industrial Internet of Things & Network Control, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract Visible light communication (VLC) is prone to overlap coverage of the adjacent VLC access points (APs), receiver occlusion, and light path interference. This study develops an AP selection algorithm for heterogeneous VLC/wireless fidelity (WiFi) networks. By considering the joint demands of transmitting and receiving, the algorithm employs a quality-of-service (QoS)-based decision-making to satisfy the differentiated resource demands of the receiving end and the transmitting equipment. First, it designs a QoS-oriented weighted information matrix for each receiver and guides the user to select the VLC AP with high received signal-to-interference-and-noise ratio, high received power, low traffic load, and low historical interruption probability. Guided by the same algorithm, the selected VLC AP preferentially serves users with strong anti-interference. Finally, to optimize the AP access, we improve the weights of the APs and users based on gravitation theory. In simulations on a uniform square layout and a mixed circular-square layout, the proposed algorithm delivers 77.3% and 11.4% more throughput respectively than the existing algorithms, and reduces the service fairness index by 53.1% and 41.1%, respectively.

Key words optical communications; visible light communication/wireless fidelity network; gravitation theory; access point selection; throughput

OCIS codes 060.4510; 060.4256; 200.2605; 040.5160

收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-02-19; 录用日期: 2019-02-25

基金项目: 国家电网总公司科技项目(52010118000Q)、重庆市自然科学基金研究与前沿探索项目(cstc2019jcyj-msxm1168)

* E-mail: liuhl@cqupt.edu.cn

1 引言

可见光通信(VLC)具有低功耗、高安全性、无需频谱认证等优势^[1-3],因而日益受到广泛的关注。VLC利用发光二极管(LED)实现信号传输,受LED辐射范围的影响,VLC网络常采用光照范围相互重叠的接入点(AP)布局方案,使用户在接收视场角(FOV)内能接收到来自多个AP的光信号。合理的AP选择方案可降低小区间干扰对用户的影响;平衡AP间负载,可以充分利用网络资源。此外,单一的VLC网络存在光链路易被遮挡、上行链路实现困难等缺陷^[4],这使VLC网络急需利用其他无线接入技术作为有效补充。已有研究表明:在VLC网络中引入无线保真(WiFi)AP形成异构VLC/WiFi网络,能增强网络覆盖面积^[5]和提高系统吞吐量^[6]。因此,在异构VLC/WiFi网络中,根据用户的信道状况和VLC AP信号是否被遮挡,在多个AP重叠覆盖下,使用户决策合理接入点是研究的重点。

文献[7]在研究异构VLC/射频(RF)混合通信方法时,提出基于数据速率门限的接入点选择方法,即当VLC AP可提供的数据速率小于门限值时,将用户迁移到RF系统。Tan等^[8]提出基于固定AP负载门限的AP选择算法,即用户根据最强信号强度申请对应VLC AP。文献[9]在研究VLC/WiFi网络时,提出一种以VLC作为补偿接入技术的WiFi AP选择算法。当WiFi资源耗尽时,最大信干噪比为用户选择VLC AP,该方案未能充分利用VLC网络资源,且未考虑VLC光链路中断情况。文献[10]中提出基于等效信干噪比(SINR)的异构VLC/WiFi网络切换算法。该算法将VLC SINR等效为达成相同数据速率时WiFi网络所需的SINR,并将相邻AP的等效SINR差值作为阈值的切换触发条件。该方案能确保用户接入两个网络中信道质量最优AP,但用户盲目追求等效SINR有可能导致AP过载。综上所述,现有研究大多仅以用户或AP为主的AP选择方案,忽略收端用户和发端AP间的紧密联系与相互选择。

万有引力理论认为空间中存在多个粒子,这些粒子具有相互吸引力,且引力值的大小与粒子间距离成反比,与粒子的质量成正比。万有引力作为解释物体间相互作用力的客观规律,除用于力学研究外,还成为其他各领域研究的热点。为描述互联网中网络流量状况,文献[11]中提出一种基于引力理

论的互联网流量矩阵建立方法,将节点的入流流量值和另一节点的出流流量值分别视为万有引力理论的粒子质量,将流量在网络中的传递过程转化为入流节点和出流节点对其间传递流量的引力,以确定网络中节点间的流量交换,该流量矩阵建立方法随后被广泛应用于互联网流量分析研究中^[12-14];此外,以万有引力为核心的引力搜索算法(GSA)根据优化问题的具体目标定义解空间中各粒子的质量,使解空间中所有粒子向质量最大的粒子移动,逐渐逼近优化问题的最优解。文献[15]中针对地下电缆线的电缆沟槽和垫层尺寸的确定问题,利用GSA求解最小化总安装成本的电缆铺设方案。在虚拟光网络节点映射问题的研究中,Zhao等^[16]在虚拟光网络中使用引力理论将物理节点的计算资源模拟为粒子的质量,通过评估两个不同物理节点间的引力,确定物理节点与虚拟节点的映射关系。

本文提出一种基于服务质量(QoS)决策的异构VLC/WiFi网络联合收发端需求的接入点选择算法。该算法利用万有引力理论,将用户的接入点选择问题模拟为用户与AP之间相互吸引的过程,通过评估用户与AP间的万有引力,为用户决策合理接入点。其具体步骤如下:1)将VLC AP合理分组,考虑不同组的VLC AP的不同受遮挡可能性;2)基于用户VLC信道状况,为VLC信道极差和极好的两类用户优先选择AP;3)收端用户设计根据用户干扰状况自适应修正的QoS权重,评估各可用AP的AP质量,将发端AP评估用户的抗干扰性能作为可服务的用户质量;4)根据用户与AP间的万有引力大小给出相应的接入结果,即当且仅当用户与AP间拥有最强相互吸引时,用户才能接入相应AP。

2 系统模型

图1所示为室内环境下异构VLC/WiFi网络

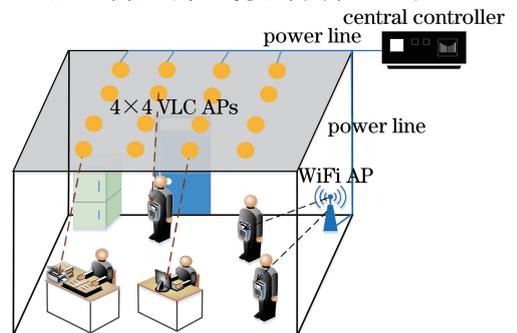


图1 异构VLC/WiFi网络下行链路模型

Fig. 1 Downlink model of heterogeneous VLC/WiFi

下行链路模型。网络包含天花板上 I 个 LED 阵列, 每个 LED 阵列被视为一个 VLC AP, 构成一个光小区。房间内放置一个 WiFi AP, 使 WiFi 网络覆盖整个房间。由于可见光上行链路出现困难, 上行信号传输由 WiFi 承载。所有 VLC AP 和 WiFi AP 通过电力线连接到同一中心控制器, 用户通过 WiFi 链路向中心控制器发出资源请求后, 中心控制器通过 VLC 或 WiFi 下行链路向用户传输资源分配信息。

2.1 VLC 传输特性

图 2 为 VLC 下行链路示意图, 其收发端分别由配置在用户设备上的光电二极管 (PD) 和天花板上的 VLC AP 组成, 其中白光 LED 采用朗伯辐射发光模型, 第 j 个用户的接收设备与地面的距离为 H_f , 与天花板的距离为 h 。在 LED 的光无线通信系统中, 最强的非视距链路至少比最弱的视距 (LOS) 路径对接收功率贡献低 7 dB^[17], 由此 VLC 系统接收到的光功率主要来自 LOS 链路, 所以主要在 VLC LOS 链路下研究 AP 的选择问题。如图 2 所示, 房间中第 j 个用户 u_j 与第 i 个 VLC AP_{*i*} 的直流信道增益 $H_{j,i}^{\text{VLC}}(0)$ 为

$$H_{j,i}^{\text{VLC}}(0) =$$

$$\begin{cases} \frac{(m+1)A_{\text{eff}}}{2\pi D_{j,i}^2} \cos^m \phi T_s(\psi) g(\psi) \cos \psi, & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases}, \quad (1)$$

式中: m 为朗伯指数; A_{eff} 为 PD 接收机的有效检测面积; $D_{j,i}$ 为发射端与接收端间的直线距离; ϕ 为 LED 发射角; ψ 为 PD 接收角; $T_s(\psi)$ 和 $g(\psi)$ 分别为光滤波器和光集中器增益; ψ_c 为用户设备视场角 FOV, 决定用户能否接收到光 LOS 信号。图 2 中 $\phi_{1/2}$ 为 LED 半功率角。

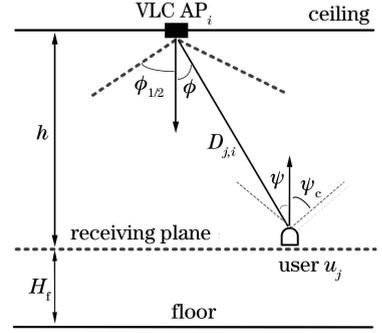


图 2 VLC 网络下行链路示意图

Fig. 2 Downlink diagram of VLC network

为保证室内照明需求, VLC 网络常采用光照相互重叠的 AP 布局方案。图 3 给出两种 AP 布局, 其 LED 半功率角为 60° , 接收机 FOV 为 45° , 光照 LOS。如图 3(a) 所示, 用户 3 被 3 个相邻小区干扰。如图 3(b) 所示, 房间角落用户 1 和用户 2 受 FOV 限制无法接收到 VLC LOS 信号, 成为通信盲区。

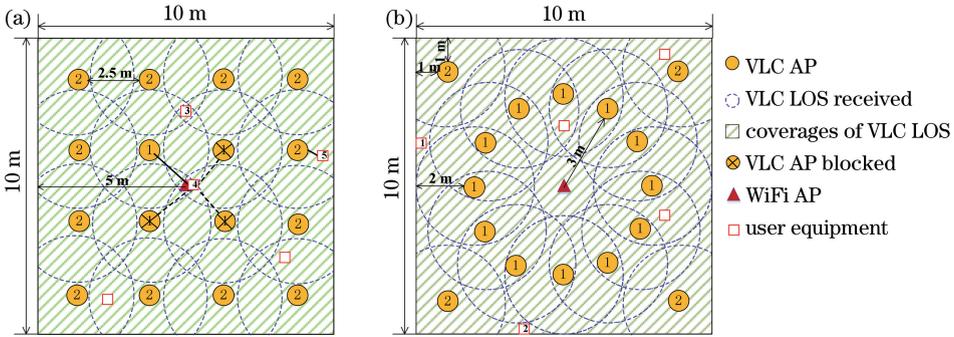


图 3 异构 VLC/WiFi 网络 LOS 信号盲区说明。(a) 方形均匀布局; (b) 混合圆方形布局

Fig. 3 Description of blind zones of LOS signal in heterogeneous VLC/WiFi networks.

(a) Uniform square layout; (b) mixed round and square layout

用户 u_j 由 VLC AP_{*i*} 服务的信噪比 $\xi_{j,i}^{\text{VLC}}$ 为

$$\xi_{j,i}^{\text{VLC}} = \frac{[\gamma P_t^{\text{VLC}} H_{j,i}^{\text{VLC}}(0)]^2}{\sum_{k \in K} [\gamma P_t^{\text{VLC}} H_{j,k}^{\text{VLC}}(0)]^2 + N_{\text{VLC}} B_{\text{VLC}}}, \quad (2)$$

式中: γ 为接收机电光转换系数; P_t^{VLC} 为 VLC 发射功率; K 为 VLC AP 的干扰集合; $H_{j,k}^{\text{VLC}}(0)$ 为第 k 个干扰 AP_{*k*} 对 u_j 的干扰信道增益; N_{VLC} 为噪声功

率谱密度, 室内环境下约为 1×10^{-21} ^[18]; B_{VLC} 为 VLC 系统通信带宽。

2.2 WiFi 传输特性

考虑系统工作在 2.4 GHz 的室内 WiFi 信道, 衰减因子模型^[4]下的路径传播损耗为

$$L_{\text{PL},j,i} = 46 + 10 \times n \times \lg D_{j,i}, \quad (3)$$

式中: $D_{j,i}$ 为 (j, i) 链路长度; n 为衰减因子, 在较封

闭室内环境下, n 通常为 3.0~3.5。

用户 u_j 由 WiFi AP $_i$ 服务的信干噪比 $\xi_{j,i}^{\text{WiFi}}$ 为

$$\xi_{j,i}^{\text{WiFi}} = \frac{P_t^{\text{WiFi}} H_{j,i}^{\text{WiFi}}}{P_{\text{noise}}^{\text{WiFi}}}, \quad (4)$$

式中: P_t^{WiFi} 为 WiFi 发射功率; $P_{\text{noise}}^{\text{WiFi}}$ 为背景噪声功率, 一般为 -86 dBm^[4]; $H_{j,i}^{\text{WiFi}}$ 为用户 u_j 和 WiFi AP $_i$ 间信道增益, 由路径传播损耗 L_{PL} 决定。

2.3 VLC 与 WiFi 的等效信干噪比与吞吐量计算

由于 VLC 网络与 WiFi 网络接入方式不同, 文献[10]中提出等效 SINR 的 AP 选择方法。通过评估 VLC 与 WiFi 中不同 SINR 值对相同吞吐量的影响, 用户可始终接入最优等效 SINR 的 AP。VLC 信干噪比 ξ^{VLC} 等效于 WiFi 网络中达成相同吞吐量所需的 SINR, 即

$$\xi^{\text{WiFi}}(\text{VLC}) = \Gamma_{\text{WiFi}} \left[\left(1 + \frac{\xi^{\text{VLC}}}{\Gamma_{\text{VLC}}} \right)^{B_{\text{VLC}}/B_{\text{WiFi}}} - 1 \right], \quad (5)$$

式中: Γ_{VLC} 和 Γ_{WiFi} 分别为 VLC 网络与 WiFi 网络的信道编码损耗因子, 且 $\Gamma_{\text{VLC}} = 5.4$ dB, $\Gamma_{\text{WiFi}} = 3$ dB^[10]; B_{VLC} 和 B_{WiFi} 分别为 VLC 网络与 WiFi 网络的通信带宽。

根据用户动态分布, 在 VLC/WiFi 网络中采用轮询 (RR) 调度机制, 每个 AP 采用时分多址 (TDMA) 方案^[1], u_j 在 1 个 RR 周期内仅由单个 AP 服务, 则用户 u_j 的吞吐量为

$$R_j = \sum_{i=0}^I s_{j,i} \frac{B_i}{N_i} \log(1 + \xi_{j,i}^{\text{VLC/WiFi}}), \quad (6)$$

式中: $s_{j,i}$ 为二进制 AP 选择记录变量, 当且仅当用户 u_j 由 AP $_i$ 服务时, $s_{j,i} = 1$; B_i 为用户 u_j 所连接的 AP $_i$ 所属网络的通信带宽; N_i 为 AP $_i$ 服务用户总数。

研究目标可描述为: 在异构 VLC/WiFi 网络中, 结合用户的信道状况和用户与接入点的双向选择, 提出能提高异构网络资源利用率的 $s_{j,i}$ 值的确定方案。

3 基于 QoS 决策的联合收发端需求的接入点选择算法

VLC 网络易受遮挡干扰影响, 用户某时刻的接入决策由遮挡干扰和可用 AP 的 QoS 共同决定。若以资源利用为目标, 用户会向光照充足和信道状况良好的房间中心移动。因用户密集更易产生光线遮挡干扰, 在当前调度周期下, 房间中心与边缘用户采用不同中断概率范围, 将 VLC AP 合理分为两

组: 组一为 VLC AP 靠近房间中心, 其中断概率范围设为 $(0, P_{\text{center}}]$; 组二为 VLC AP 在房间四周靠近墙壁处, 其中断概率范围设为 $(0, P_{\text{around}}]$ ($P_{\text{around}} < P_{\text{center}}$)。依据中断概率, 确定各 AP 在当前调度周期是否被遮挡。

房间中 VLC AP 数量多, VLC 网络所能提供的带宽远大于 WiFi 网络, 因此, 本研究优先针对 VLC 网络, 为用户选择 VLC AP 进行接入。所提接入点选择算法可分为两类: VLC 链路取极端条件下的两类用户的初始分配过程和剩余用户基于 QoS 决策联合收发端需求的接入点选择算法。

3.1 初始分配过程

结合 VLC AP 与 WiFi AP 覆盖范围与用户位置, 为两类用户优先选择 AP 进行接入, 同时, 提出弱者保护与精英优先两条准则, 以保证两类用户的用户性能。

1) 弱者保护准则 (VLC 信道极差)。部分用户受遮挡干扰影响或用户处于 VLC 视距链路盲区 [图 3(b) 中用户 1、2], 导致不能接收到 VLC LOS 信号。为在调度过程中不抛弃此类用户, 在初始分配过程中选择 WiFi AP 为其服务。

2) 精英优先准则 (VLC 信道极好)。若在考虑遮挡状况后, 用户接收信号仅来自单一的 VLC AP 或 WiFi AP, 表明该用户在当前网络中信道状况最优, 且不受其他 AP 干扰, 此类用户为潜在的精英用户。如图 3(a) 所示, 精英用户主要分为两类。第一类以用户 4 为代表, 去除被遮挡 VLC AP 后, 用户 4 满足精英条件, 但用户 4 距可用剩余 VLC AP 较远, 处于 WiFi AP 覆盖中心, 此时 WiFi AP 可提供更强的 SINR, 所以精英优先准则为此类用户评估接收到的 VLC 等效信干噪比和 WiFi 信干噪比。若 $\xi^{\text{WiFi}}(\text{VLC}) > \xi^{\text{WiFi}}$, 则为用户接入 VLC AP; 反之, 接入 WiFi AP。第二类以用户 5 为代表, 在可用 VLC AP 覆盖中心, 此类用户利用精英优先准则直接接入 VLC AP, 抢占 VLC 资源。

3.2 剩余用户基于 QoS 决策的接入点选择

基于万有引力理论, 为剩余用户选择 VLC AP 接入。考虑收端用户与发端 AP 的差异化资源分配需求, 分别基于用户角度和 AP 角度设计可用 AP 质量和可服务用户质量。模拟用户与 AP 间的万有引力表征用户与 AP 间的相互作用, 可使接入点选择算法充分发掘网络资源, 提高系统资源利用率。

3.2.1 构建信息矩阵

通过中心控制器中存储的 AP 的 ID 编号, 用户

u_j 检测出在当前调度周期 N 的可用 AP 集合 S_j 。根据可用 AP 集合为待分配用户 u_j 收集 QoS 信息, 建立的信息矩阵 $\mathbf{E}_{\text{inf}_j}$ 为

$$\mathbf{E}_{\text{inf}_j} = [\mathbf{e}_{\text{inf}}]_{(i+1) \times n, i \in S_j} = \begin{bmatrix} \xi_{0,j} & P_{r0,j} & L_{0,j} & P_{\text{hb}0,j}^{-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \xi_{i,j} & P_{ri,j} & L_{i,j} & P_{\text{hb}i,j}^{-1} \end{bmatrix}_{(i+1) \times 4}, \quad (7)$$

式中: n 为信息矩阵中考虑的 QoS 个数, 且 $n=4$; ξ 为 VLC AP $_i$ 对用户 u_j 的信干噪比, 下标分别代表集合序号和用户序号, 其余类似; P_r 为接收功率; P_{hb}^{-1} 为 u_j 可用 VLC AP $_i$ 历史中断概率 P_{hb} 的倒数, 由调度周期 VLC AP 的中断概率 P_{around} 、 P_{center} 可确定 AP 被遮挡状况, 统计前 $N-1$ 个调度周期中 u_j 可用 VLC AP $_i$ 发生中断次数可得历史中断概率 P_{hb} , P_{hb}^{-1} 驱使用户选择不易发生中断的 VLC AP 进行接入; 设计动态负载系数 L 以调整负载状况对接入决策的影响。定义 L 为

$$L_{i,j} = \begin{cases} \left(\frac{F_i}{\sum_{a \in S_j} F_a} \right)^{-1}, & \text{if } F_i \neq 0 \\ (L_{i,j})_{\text{global}} + 1, & \text{if } F_i = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: F_i 为 AP $_i$ 负载用户数; $L_{i,j}$ 值越大, AP $_i$ 负载越小。当 $F_i=0$, 即 AP $_i$ 空载时, $L_{i,j}$ 被赋予略大于当前分配阶段已出现的全局最大负载的权重。(8)式能保证在接入点选择后期, 用户能自适应选择

低负载大权重 AP 接入, 实现均衡 AP 负载的效果。

考虑到信息矩阵 $\mathbf{E}_{\text{inf}_j}$ 中各 QoS 因素的量纲不同, 在此对信息矩阵 $\mathbf{E}_{\text{inf}_j}$ 进行无量纲处理, 得到用户 u_j 的无量纲信息矩阵 $\mathbf{M}_j = [m_{\text{normal}}]_{i \times n}$, 其中无量纲信息矩阵中规范化元素 $m_{\text{normal } i, n}$ 定义为

$$m_{\text{normal } i, n} = \frac{e_{\text{inf } i, n}}{\sqrt{\sum_{i \in S_j} (e_{\text{inf } i, n})^2}}. \quad (9)$$

3.2.2 收端评估可用 AP 质量

考虑到 AP 提供的各 QoS 对信道状况不同的接收端用户表现出差异化影响程度, 引入信息熵客观表征各 QoS 对收端用户 u_j 的影响程度, 进一步引入在用户干扰指示系数 P_{I_j} 设计中根据用户信道状况自适应修正的 QoS 权重 w_n 。

计算各 QoS 的信息熵, 将其作为评估用户 u_j 可用 AP 质量的客观依据, 第 n 个 QoS 的信息熵 e_n 可表示为

$$e_n = -\frac{1}{\ln N_j} \sum_{i \in S_j} p_{i, n} \ln p_{i, n}, \quad (10)$$

式中: $N_j = |S_j|$ 为用户 u_j 可用 VLC AP 总数; $p_{i, n}$ 为在无量纲信息矩阵 \mathbf{M}_j 中, QoS $_n$ 对 AP $_i$ 的影响与 QoS $_n$ 对所有可用 AP 的影响之比。

根据 QoS $_n$ 所含信息量, 结合用户所受干扰状况, 设计 QoS $_n$ 的自适应权重 w_n , 以优化 QoS $_n$ 在接入决策中的作用, 定义自适应权重 w_n 为

$$w_n = \begin{cases} \frac{P_{\text{I}_j} [\max_n(e_n) - e_n]}{\max_n(e_n) - \text{avg}_n(e_n)} + \frac{(1 - P_{\text{I}_j}) [e_n - \text{avg}_n(e_n)]}{\max_n(e_n) - \text{avg}_n(e_n)}, & \text{if } e_n \geq \text{avg}_n(e_n) \\ P_{\text{I}_j}, & \text{if } e_n < \text{avg}_n(e_n) \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $\max(e_n)$ 、 $\text{avg}(e_n)$ 分别为最大和平均 QoS 信息熵; P_{I_j} 为 u_j 的干扰指示系数, 可表示为

$$P_{\text{I}_j} = \min\left(\frac{T_j}{M}, P_{\text{th}}\right), \quad (12)$$

式中: T_j 为用户 u_j 的干扰 AP 总数, 用户信道质量越好, T_j 值越小; M 为 VLC AP 数目; 限制最大干扰指示系数 P_{I_j} 小于门限值 P_{th} 。若 QoS $_n$ 信息熵大于平均值, 则根据用户所受干扰状况, w_n 能进一步放大该 QoS $_n$ 对接入决策的影响; 若 QoS $_n$ 信息熵小于平均值, 则直接采用干扰指示系数 P_{I_j} , 根据用户受干扰状况, 减小 QoS $_n$ 对接入决策的影响。

基于自适应权重 w_n 和加权信息矩阵 \mathbf{M}_j , 收端用户 u_j 计算综合考虑可用 AP 提供信干噪比、接收

功率、负载系数和历史中断概率的加权信息矩阵 \mathbf{W}_j , 矩阵 \mathbf{W}_j 可表示为

$$\mathbf{W}_j = [w_{\text{inf}}]_{i \times n} = [w_n \times m_{\text{normal } i, n}]_{i \times n}. \quad (13)$$

依据逼近理想解排序算法 (TOPSIS)^[19] 对加权信息矩阵 \mathbf{W}_j 中各元素进行处理, 收端用户 u_j 计算可用 VLC AP $_i$ 质量 $f_{i, j}$ 为

$$f_{i, j} = \frac{D_{i, j}^-}{D_{i, j}^- + D_{i, j}^+}, \quad (14)$$

式中: $D_{i, j}^-$ 和 $D_{i, j}^+$ 分别是 AP $_i$ 距负理想解与理想解的欧氏距离。VLC AP $_i$ 的质量 $f_{i, j}$ 值越大, 表示用户 u_j 在所有可用 AP 中对 VLC AP $_i$ 更为偏爱。

3.2.3 发端评估可服务用户质量

用户质量取决于用户特征。考虑到 VLC 网络

中多个 LED 的覆盖范围常相互重叠,此时小区间干扰将严重影响网络传输性能,所以选取用户的抗干扰性能评估用户质量 $m_{i,j}$ 。给定用户质量 $m_{i,j}$ 为

$$m_{i,j} = \exp \left[\frac{P_{\text{PIR},i,j}^2}{\sum_{i \in S_j} (P_{\text{PIR},i,j}^2)} \right], \quad (15)$$

$$P_{\text{PIR},i,j} = \frac{P_{r,i,j}}{T_j}, \quad (16)$$

式中: $P_{\text{PIR},i,j}$ 为用户抗干扰系数(PIR)。 $P_{r,i,j}$ 值越大,用户 u_j 的抗 VLC AP i 临近光小区干扰的性能越强。(15)式从发射端考虑,若连接 VLC AP i 的 u_j 的抗 VLC AP i 临近光小区干扰性能越强,AP i 可服务用户 u_j 用户质量 $m_{i,j}$ 值越大,AP i 在所有可服务用户中将优先考虑为抗干扰性强的 u_j 服务。

3.2.4 评估用户与 AP 间万有引力

根据已求用户和 AP 质量,建立用户与 AP 的相互选择关系,定义用户与 AP 间引力 $g_{i,j}$ 为

$$g_{i,j} = N_j \times \frac{m_{i,j} \times f_{i,j}}{D_{j,i}^2}, \quad (17)$$

式中: $f_{i,j}$ 为以接收端用户为中心求解的可用 AP 质量; $m_{i,j}$ 为以发射端为中心考虑用户抗干扰性能求解的用户质量; N_j 为用户 u_j 可用 VLC AP 总数; $D_{j,i}$ 为 u_j 与 AP i 间物理距离。通过引力 $g_{i,j}$ 建立用户 u_j 与 AP i 双向选择关系,并为用户 u_j 选择相互作用最大的 AP d ,标记二进制接入点选择记录变量 $s_{j,d}=1$ 。

基于 QoS 决策的异构 VLC/WiFi 网络联合收发端需求的 AP 选择(QDJTR)算法的输入为:用户位置,中断概率,用户集合 U , AP 集合 A ,用户可用 AP 集合 S ,输出为:AP 选择记录变量 $s_{j,i}$ 。具体步骤如下:

- 1) 初始化用户编号 $j=0$, AP 编号 $i=0$ 。
- 2) 根据用户接收功率和所受干扰状况,并根据(16)式为每个 VLC AP 评估连接 AP i 的 u_j 的抗干扰性能,利用(15)式得到可服务用户质量。 $i=i+1$,转步骤 3)。
- 3) 判断 i 是否等于最大 VLC AP 数,若等于,则为发端 AP 记录可服务用户质量,转步骤 4);否则,转步骤 2)。
- 4) 评估用户 u_j 是否满足初始分配条件,若满足,按照弱者保护或精英优先原则比较等效信干噪比,为用户接入 WiFi AP i 或 VLC AP i ,标记选择变量 $s_{j,i}=1, j=j+1$,转步骤 7);否则,转步骤 5)。
- 5) 为 u_j 收集可用 AP 的信干噪比、接收功率、VLC AP 负载状况及 VLC AP 历史中断概率,根据

(7)式,为用户建立信息矩阵 $E_{\text{inf},j}$,利用(11)式自适应对信息矩阵加权,利用 TOPSIS 理论与(14)式得到可用 AP 质量,即用户对可用 AP 偏好,转步骤 6)。

6) 由(17)式评估用户与 AP 的相互作用,如果 AP 编号 $d = \text{argmax}_i (g_{i,j})$,标记分配变量 $s_{j,d}=1$;否则 $s_{j,d}=0$ 。 $j=j+1$,转步骤 7)。

7) 判断 j 是否等于最大用户数,若等于,输出所有用户接入选择;否则,转步骤 4)。

4 仿真及分析

仿真模型以 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的房间为例,在图 3(a)方形均匀布局结构(见文献[7])及图 3(b)新型混合圆方形布局结构中进行验证(基于文献[20],在 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 房间中提出的布局之上略作调整,每个 VLC AP 包含 100 个 LED 芯片,图 4 为该布局最低和最高光照为 338.73 lx 和 1344.77 lx ,符合室内照明 $300 \sim 1500 \text{ lx}$ 的照明标准^[21])。房间中安装 16 个 VLC AP 和 1 个 WiFi AP,见图 3;用户距地面高度为 1 m ;VLC 发射机及其他系统参数如表 1 所示。

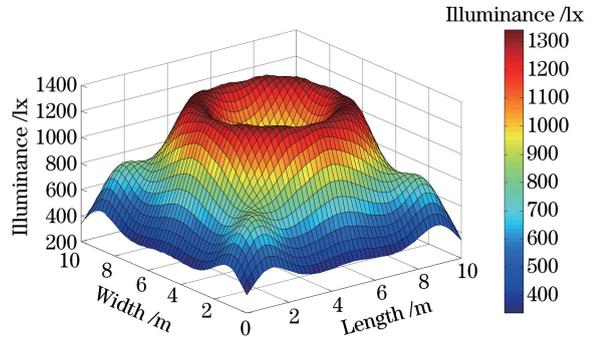


图 4 混合圆方形布局三维光照分布图

Fig. 4 Three-dimensional illumination for mixed round and square layout

4.1 吞吐量分析

假设用户在两种房间布局内随机移动,每隔 Δt 时刻收集用户信道状态信息,然后在 256 个调度周期内执行所提基于 QoS 决策的 AP 选择算法。

图 5 为用户 FOV 为 60° 时提出的基于 QoS 决策的异构 VLC/WiFi 网络联合收发端需求的接入点选择(QDJTR)算法、基于改进的等效 SINR 以及传统基于最大接收信干噪比的 AP 分配算法在两种布局下的系统吞吐量性能。由两种布局仿真结果可以看出,混合圆方形布局下 AP 分布比方形布局更为靠近房间中心,混合圆方形布局较方形均匀布局易受 VLC 中断概率 P_{center} 的影响。受用户信息矩

阵中历史中断概率 P_{hb} 的影响,所提算法混合圆方形布局中系统吞吐量性能略低于方形均匀布局,而不考虑 P_{hb} 的另外 2 种对比算法,能在干扰状况较为简单的圆方形布局下获得更优的吞吐量,所提算

法仍然能保持系统吞吐量优势,其系统吞吐量较基于改进的等效 SINR 算法在两种布局中分别增大了 77.3% 和 11.4%。

表 1 异构 VLC/WiFi 网络仿真参数

Table 1 Simulation parameters for heterogeneous VLC/WiFi network

Symbol	Parameter	Value
$\phi_{1/2}/(^{\circ})$	Semi-angle at half-power	60
FOV /($^{\circ}$)	Field of view	60
P_t^{VLC}/W	VLC transmitted power	15
T_{s0}	Gain of optical filter	1.0
g_0	Gain of optical concentrator	1.0
A_{eff}/cm^2	Effective area of PD	1.0
B_{VLC}/MHz	Bandwidth of VLC system	40
$\gamma/(A \cdot W^{-1})$	Optical to electric conversion efficiency	0.53
$N_{VLC}/(10^{-21} A^2 \cdot Hz^{-1})$	Noise power spectral density	1
P_{th}	Threshold of interference indication coefficient	0.5
P_t^{WiFi}/dBm	WiFi transmitted power	20
B_{WiFi}/MHz	Bandwidth of WiFi system	22
f_c/GHz	Central carrier frequency	2.4
P_n/dBm	Background noise power	-86

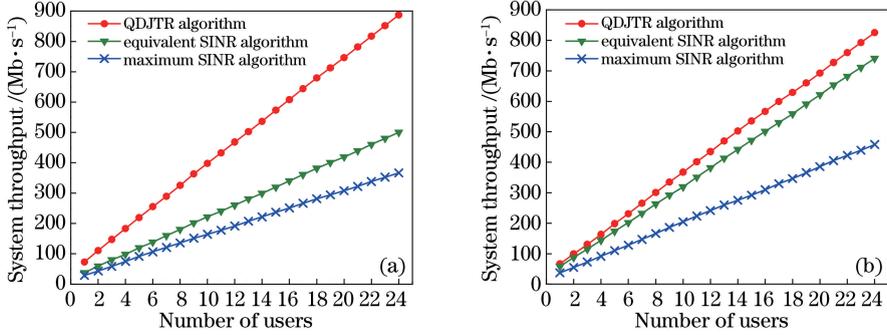


图 5 系统吞吐量随用户数变化的情况。(a)方形均匀布局;(b)混合圆方形布局

Fig. 5 System throughput versus number of users. (a) Uniform square layout; (b) mixed round and square layout

在实际情况中,VLC LOS 覆盖范围随 FOV 需求的不同而有所变化。FOV 较小时房间呈现大量 VLC LOS 盲区,盲区内用户均需采用弱者保护准则保护;FOV 增大可使用户能够在更广范围内接收

到 VLC LOS 信号,但用户在 FOV 内将检测到更多的 AP,使用户的 AP 接入决策更为困难。图 6 为用户平均吞吐量随 FOV 的变化情况。由图 6 可以看出,随着 FOV 增大小区间干扰逐渐上升,用户平均

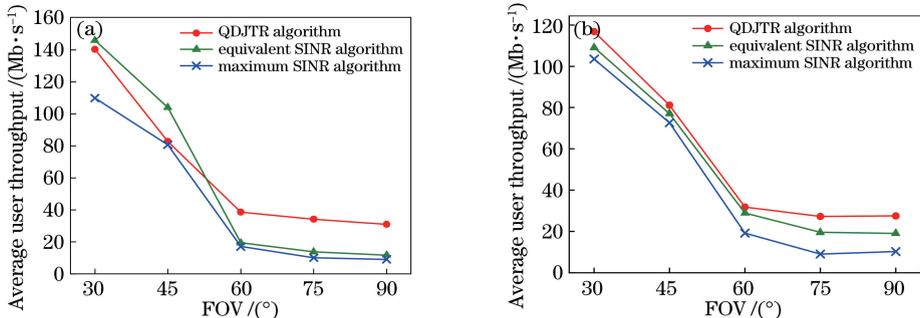


图 6 用户平均吞吐量随 FOV 的变化情况。(a)方形均匀布局;(b)混合圆方形布局

Fig. 6 Average user throughput versus FOV. (a) Uniform square layout; (b) mixed round and square layout

吞吐量逐渐减小。相比于其他两种方法,所提算法由于在设计初始分配过程时考虑了 FOV 过小造成的 VLC LOS 盲区,且在设计用户质量时立足于用户的抗干扰性能,所以所提算法具有一定的稳健性,用户平均吞吐量在两种布局中下降最为平缓,能有效对抗干扰,可确保用户在干扰增大时仍能获得最优用户平均吞吐量。

4.2 公平性分析

考虑到异构 VLC/WiFi 网络中接入 VLC 与 WiFi 的用户数是不确定的,用户对网络资源的利用是需要被评估的重要参数。图 7 为 3 种 AP 选择算法的网络平均公平性(NAF)^[22],NAF 越趋近于 0 网络平均公平性越好,当 NAF 为 0 时,表示该异构网络能够使 VLC 的用户数与 VLC 用户贡献的系统吞吐量成正比,网络资源被充分利用。由图 7 可知,所提 QDJTR 算法的网络公平性最优,且混合圆方形布局的网络公平性优于方形均匀布局。

图 7 仿真是基于网络角度评价网络资源利用,然而用户才是系统性能的直接反馈者。图 8 利用业

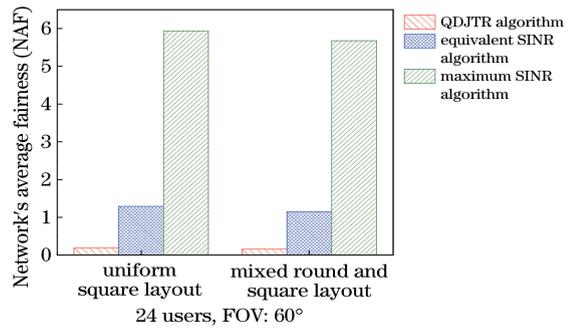


图 7 两种布局下网络平均公平性比较
Fig. 7 Comparison of network average fairness under two layouts

务公平性指数(SFI)^[22]从用户角度评估用户公平性,其 SFI 越趋近于 0,不同用户间吞吐量差异越小,即用户公平性越高。由仿真结果可知,随着用户数的增大,SFI 逐渐增大,用户业务公平性减小,而所提 QDJTR 算法的业务公平性能明显优于其他两种算法。这表明当系统潜在负载增大时,所提算法可以有效协调网络资源利用,保证用户间仍能获得公平的用户体验,其 SFI 较于基于等效 SINR 算法在两种布局中分别减小了 53.1%和 41.1%。

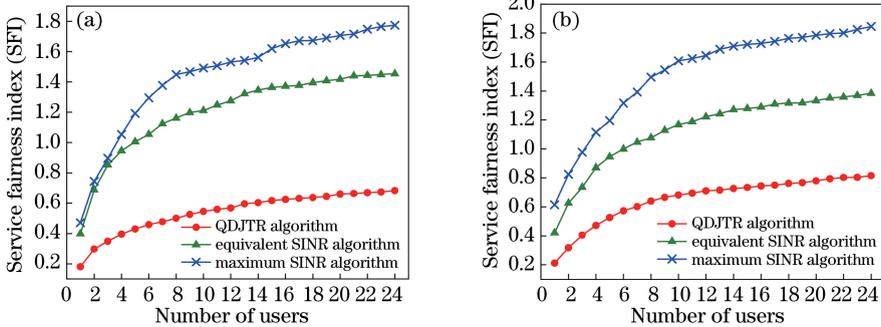


图 8 用户业务公平性随用户数的变化情况。(a)方形均匀布局;(b)混合圆方形布局

Fig. 8 Service fairness index versus number of users. (a) Uniform square layout; (b) mixed round and square layout

5 结 论

提出了一种基于 QoS 决策的异构 VLC/WiFi 网络联合收发端需求的接入点选择算法。利用 WiFi 网络作为补充技术缓解 VLC 覆盖盲区以及易被遮挡问题。考虑发射端与接收端的差异化资源分配需求,为收端用户设计综合负载系数、中断概率等 QoS 因素的可用 AP 质量,为发端 AP 依据抗干扰性能设计可服务用户质量。基于引力理论评估 AP 与用户的相互作用,决策用户的 AP 接入。仿真结果表明:在方形与混合圆方形布局下,所提算法可以最大限度地利用异构 VLC/WiFi 网络资源,能显著提高吞吐量与公平性性能。

参 考 文 献

[1] Liu H L, Xia P J, Chen Y, *et al.* Interference graph-based dynamic frequency reuse in optical attocell networks[J]. Optics Communications, 2017, 402: 527-534.

[2] Yin H H, Dong Y Q, Zou Q, *et al.* Design and implementation of a visible light communication system based on the mobile scenario[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 29(4): 487-493.

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(自然科学版),2017,29(4):487-493.

- [3] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [4] Wang C X, Jian C X, Liu L K, *et al.* QoE-based handover scheme for indoor VLC-WiFi heterogeneous systems[J]. Journal of Signal Processing, 2017, 33(9): 1191-1198.
王春喜, 菅春晓, 刘洛琨, 等. 基于用户体验的VLC/WiFi异构网络切换算法[J]. 信号处理, 2017, 33(9): 1191-1198.
- [5] Basnayaka D A, Haas H. Design and analysis of a hybrid radio frequency and visible light communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(10): 4334-4347.
- [6] Hammouda M, Akin S, Vegni A M, *et al.* Link selection in hybrid RF/VLC systems under statistical queueing constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2738-2754.
- [7] Wang J J. Hybrid communication method combining RF system and multiple VLC[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(2): 115-120.
王俊珺. 结合射频系统和多个VLC的混合通信方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(2): 115-120.
- [8] Tan C H, Choong F C M, Teo Y C, *et al.* Power optimization in hybrid visible light communication for indoor applications [C] // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), August 8-11, 2016, Shanghai, China. New York: IEEE, 2016: 3434-3437.
- [9] Wu X P, Safari M, Haas H. Access point selection for hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5375-5385.
- [10] Zheng H T, Ji X S, Huang K Z, *et al.* Novel vertical handoff algorithm based on equivalent SINR between VLC and WiFi[J]. Application Research of Computers, 2016, 33(3): 832-835, 839.
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, 839.
- [11] Roughan M. Simplifying the synthesis of internet traffic matrices [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2005, 35(3): 93-96.
- [12] Zhang Y, Roughan M, Lund C, *et al.* Estimating point-to-point and point-to-multipoint traffic matrices: an information-theoretic approach [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2005, 13(5): 947-960.
- [13] Wu Y S, Guo B, Shen Y, *et al.* A cross-layer optimization and design approach under QoS constraints for green IP over WDM networks [J]. Computer Networks, 2015, 76: 177-190.
- [14] Tune P, Roughan M. Controlled synthesis of traffic matrices [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(3): 1582-1592.
- [15] Perović B D, Tasić D S, Klimenta D O, *et al.* Optimising the thermal environment and the ampacity of underground power cables using the gravitational search algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 423-430.
- [16] Zhao G Q, Xu Z Q, Ye Z L, *et al.* A load balancing algorithm based on key-link and resources contribution degree for virtual optical networks mapping[C] // International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems, July 21-23, 2017, Dalian, China. New York: IEEE, 2017: 63-67.
- [17] Dong J M, Zhang Y Y, Zhu Y J. Convex relaxation for illumination control of multi-color multiple-input-multiple-output visible light communications with linear minimum mean square error detection [J]. Applied Optics, 2017, 56(23): 6587-6595.
- [18] Kazemi H, Haas H. Downlink cooperation with fractional frequency reuse in DCO-OFDMA optical attocell networks[C] // IEEE International Conference on Communications, May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE, 2016, 978: 1-6.
- [19] Amanor D N, Edmonson W W, Afghah F. Link performance improvement via design variables optimization in LED-based VLC system for inter-satellite communication [C] // IEEE International Conference on Wireless for Space & Extreme Environments, October 10-12, 2017, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2017, 978: 7-12.
- [20] Wang Z X, Yu C Y, Zhong W D, *et al.* Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems[J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564-4573.
- [21] Chen Y, Shen Q X, Liu H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506003.
陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506003.
- [22] Li X, Zhang R, Hanzo L. Cooperative load balancing in hybrid visible light communications and WiFi[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4): 1319-1329.