

基于象限分割的迟滞软切换 VLC-WiFi 接入选择算法^{*}

张慧颖 梁士达 李月月 盛美春 马成宇

(吉林化工学院信息与控制工程学院 吉林 132022)

摘要: 针对解决无线网络频谱匮乏、用户频繁切换问题,本文提出一种基于象限分割的 VLC-WiFi 异构接入与迟滞软切换算法。依照三维坐标系将室内分割为 4 部分建立用户速率模型,获取用户速率,建立遮挡模型模拟 VLC 链路被遮挡情景。用户依据所在位置、象限、遮挡及速率等参数执行接入操作;切换依据迟滞思想将向内切换与向外切换阈值差异化,使切换存在弹性空间从而抑制乒乓效应。在 5 m×5 m×5 m 室内空间内经过多次实验表明,提出的室内 VLC-WiFi 异构组网方案水平切换次数降低 43.8%,遮挡及垂直切换数降低 45.3%,乒乓次数降低 52.27%,吞吐量比传统算法提升约 5.84%。该算法可以显著降低切换与乒乓次数。因此本文为室内异构网络通信研究提供理论依据。

关键词: 光通信;VLC-WiFi 网络;用户分配;乒乓效应;吞吐量

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5025

Hysteresis soft-switching VLC-WiFi access selection algorithm based on quadrant partitioning

Zhang Huiying Liang Shida Li Yueyue Sheng Meichun Ma Chengyu

(School of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: In order to solve the problem of spectrum scarcity and frequent user switching in wireless networks, this paper proposes a VLC-WiFi heterogeneous access and hysteresis soft switching algorithm based on quadrant segmentation. According to the three-dimensional coordinate system, the indoor area is divided into four parts to establish a user rate model, obtain the user rate, and establish an occlusion model to simulate the scenario of VLC link being occluded. Users perform access operations based on parameters such as location, quadrant, occlusion, and speed. Switching differentiates the threshold between inward switching and outward switching based on hysteresis, creating a flexible space for switching and suppressing the ping pong effect. In the 5 m×5 m×5 m indoor space, multiple experiments have shown that the indoor VLC-WiFi heterogeneous networking scheme proposed in this article reduces the number of horizontal switches by 43.8%, the number of occlusion and vertical switches by 45.3%, the number of ping-pong times by 52.27%, and the throughput by about 5.84% compared to traditional algorithms. This algorithm can significantly reduce switching and ping-pong times. Therefore, this article provides a theoretical basis for the study of indoor heterogeneous network communication.

Keywords: optical communication; VLC-WiFi network; user allocation; ping-pong effect; throughput

0 引言

在当今社会中,移动通信互联网业务量的飞速增加对频谱的要求越来越高,频谱匮乏的问题愈发明显。在文献[1]中作者提出了基于服务质量(quality of service, QoS)切换

决策 VLC/Wi-Fi 异构网络结合接收端和发射端的用户需求接入点的选择,该算法利用用户处于的信道质量对用户进行分类,Wi-Fi 是不处于 VLC 辐射范围内用户的补充网络。该算法显著的提升了系统的吞吐量和用户满意度,但并未对用户存在的乒乓效应问题进行分析。在文献[2]中,

作者利用 LiFi 和 WiFi 链路的不同传播特性为终端服务,也就是利用 LiFi AP 提供高速链路,同时利用 WiFi AP 满足终端对最小数据速率的 QoE 要求。然后将联合资源的优化问题表述为考虑各终端对最小数据速率要求的混合整数非线性规划问题。仿真结果表明作者所提算法相比基准网而言可获得更好的吞吐量和满意度,但文中并未分析用户乒乓效应问题。在文献[3]中,作者提出了基于强化学习(reinforcement learning, RL)的动态负载均衡的混合 LiFi-WiFi 网络。RL 奖励函数的设计不仅要最大化长期的平均网络吞吐量,而且提高了用户的满意度和公平性,但文中并未对用户切换存在的乒乓效应进行研究。在文献[4]中作者提出了一种室内混合 VLC/RF 异构无线网络传输模型。通过引入辅助变量和连续凸近似方法,将原非凸问题转换为一个凸优化问题,利用拉格朗日对偶原理获得传输功率和带宽分配的解析解,并进行计算复杂度分析。仿真结果验证了该算法具有较快的收敛性和较高的传输速率,但算法较为复杂且未提升系统吞吐量,在用户乒乓效应问题上也未分析。在文献[5]中作者在 VLC-WiFi 异构网络的资源管理问题上,使用了比例公平算法和最大载干比算法,并对算法进行了优化研究,实验表明优化后算法在系统吞吐量及访问时延等方面有所提升,但并未对用户存在的乒乓效应进行相关分析。

基于此,本文提出一种基于象限分割的迟滞软切换混合 VLC-WiFi 接入点选择(heterogeneous access and hysteresis soft switching, HAHSS)算法。在室内建立坐标系,将室内空间分割为 4 个象限,依据实际情况建立速率模型、遮挡模型。用户依据自身位置获取速率值,依据速率值与遮挡情况接入对应网络。用户网络切换利用迟滞思想,使用迟滞软切换结合水平切换方案缓解用户乒乓效应。仿真表明,与传统室内 VLC 通信相比,所提 VLC-WiFi 异构网络方案可有效缓解频谱资源匮乏问题,进一步提升系统容量,降低用户乒乓次数。

1 室内可见光信道模型

在室内环境下采用朗伯照度模型,光信号在信道中的传播符合朗伯模型,包含视距传播(line of sight, LOS)和非视距传播(non line of sight, NLOS)^[6]。其中视距下的传播效果更大,非视距传播包含一次反射、二次反射及更高次反射。通过计算得到光线在反射 3 到 10 次时对系统的影响微乎其微,在室内光线反射交叉叠加且极其复杂,大部分光线需在反射 3 次以上才会被光电探测器(photoelectric detector, PD)接受^[7],因此本文不考虑反射情况。

发射光功率 P_t 与接受光功率 P_r 之间的关系^[8]为:

$$P_r = P_t H_{\text{LOS}}(0) \quad (1)$$

式中: $H_{\text{LOS}}(0)$ 是可见光通信中 LOS 的信道增益。PD 接收端在视距传播条件下的光直射增益 $H_{\text{LOS}}(0)$ 有效值可表示为式(2)。

$$H_{\text{LOS}}(0) = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) \cos(\psi) T_s(\psi) g(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c \\ 0, & \psi > \psi_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为 PD 的面积^[9]; d 为 LED 到 PD 的相对距离; ψ 为接收角; ψ_c 为 PD 最大视场角; $T_s(\psi)$ 为 PD 的光滤波器增益; $g(\psi)$ 为聚光器增益^[10]; 将式(1)和(2)联立即可推导出 LED 与 PD 间的距离 d 为:

$$d = [(m+1)A \cos^m(\varphi) \cos(\psi) T_s(\psi) g(\psi) P_t / (2\pi P_r)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: n 为朗伯散射系数,朗伯系数大小由 LED 灯的半功率角 $\psi_{\frac{1}{2}}$ 决定。LED 发光强度模型如下^[11]:

$$\begin{cases} I_\theta = I_0 \cos^m \psi \\ m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \psi_{\frac{1}{2}})} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_θ 为发射角 n 的发光强度; I_0 为垂直于发光面的发光强度^[12]。

2 VLC-WiFi 异构网络模型构建

2.1 四象限分割模型构建

以房间地板中心为原点建立坐标系,将房间内部空间按象限分割为 4 部分,4 个 LED 阵列分别布置在 4 个象限的天花板中心位置,WiFi 收发器布置在房间正中心原点位置,使得 WiFi 均匀覆盖整个房间^[13],如图 1 所示。

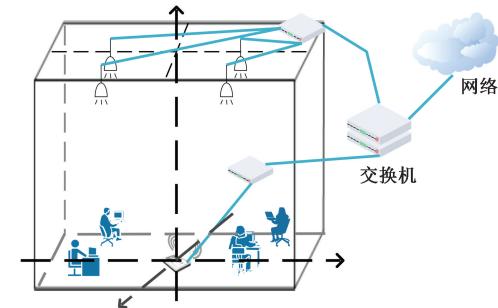


图 1 异构象限分割模型

设天花板上 4 个 LED 阵列为 $U_k, k = (1, 2, 3, 4)$ 。由于用户接入网络设备普遍位于 $z = 1$ 左右^[14],本文设定 $z = 1$ 。由式(5)判断房间内部空间分割后 U_k 所在象限:

$$N_{ri} = \begin{cases} \zeta_i + 4\eta_i, & x > 0 \\ 2\zeta_i + 3\eta_i, & x \leq 0 \end{cases}, i = (1, 2, \dots, 10) \quad (5)$$

式中: N_{ri} 为输入顶点所在象限, ζ 和 η 为两个布尔变量,其中:

$$\zeta_i = \begin{cases} 0, & y_i < 0 \\ 1, & y_i \geq 0 \end{cases}, i = (1, 2, \dots, 10) \quad (6)$$

$$\eta_i = \begin{cases} 0, & y_i > 0 \\ 1, & y_i \leq 0 \end{cases}, i = (1, 2, \dots, 10) \quad (7)$$

2.2 速率模型构建

设单 U_k 最大吞吐速率为 4 000 Mbps, WiFi 最大吞吐速率为 1 024 Mbps^[15]。依据 2022 年第 1 季度 5 G 网络平均下行接入速率为 334.98 Mbps, 设定单个用户最大速率为 41.87 Mbit/s, 取最大速率的 1/2 为最小速率需求。当今家庭使用的主流路由器服从 IEEE 802.11ac 标准^[16], 取 WiFi 速率为 1 Gbps^[17] 即 $V_{\text{WiFi}} = 128 \text{ Mbit/s}$ 。在房间内随机有 10 个用户此时在使用网络。当用户接入网络时, 首先由式(8)计算 U_k 到用户设备的欧氏距离 D_i :

$$D_i = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}, i = (1, 2, \dots, 10), k = (1, 2, \dots, 4) \quad (8)$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 为用户在房间位置, (x_j, y_j, z_j) 为 U_k 在房间中位置^[18]。由式(9)计算出 U_k 到房间边缘的欧氏距离:

$$D_e = \sqrt{(x_j - x_k)^2 + (y_j - y_k)^2 + (z_j - z_k)^2}, j = k = (1, 2, \dots, 4) \quad (9)$$

其中, (x_k, y_k, z_k) 为房间的边缘坐标。依据用户的位置以及到 U_k 的距离, 由式(10)获得可见光网络在用户所在位置能提供的最大速率 V_i 。

$$V_i = (1 - \frac{D_i}{D_e})V_{\text{max}}, i = (1, 2, \dots, 10) \quad (10)$$

V_i 会随着用户到 U_k 的距离衰减, 其值由用户到 U_k 的距离和光照强度共同决定。距离越大 V_i 越小, 光照强度同理。其中, D_i 为 U_k 到用户的欧氏距离, D_e 为 U_k 到房间边缘的欧氏距离, V_{max} 为 U_k 当前提供的最大速率。依据式(10)计算用户不同位置 4 个 VLC 网络和 WiFi 的速率值。

2.3 遮挡模型构建

VLC 通信中采用的是直射链路, 且由于用户移动具有随机性, 在现实生活中一定存在链路遮挡中断的问题, 当 U_k 的直射链路被遮挡时 VLC 通信会直接中断, 影响用户的通信和体验质量, 为了还原现实, 本文模拟这种情况的发生^[19], 设置随机概率函数 Z 为:

$$Z = \begin{cases} 1, & p_i < 0.2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, i = (1, 2, \dots, 10) \quad (11)$$

设有 20% 遮挡率, 其中: p 为 0~1 的随机数代表遮挡概率。当 Z_i 为 1 时代表用户当前 VLC 链路被遮挡, 当 Z_i 为 0 时代表未被遮挡。

3 HAHSS 算法的接入模型设计

HAHSS 算法以四象限分割模型为基础, 此外融合速率、遮挡模型, 为用户选择合适的通信网络。HAHSS 算法主要分为接入与切换两部分, 用户由所在象限 VLC 通信向其他 U_k 或 WiFi 切换称为向外切换, 相反称为向内切换。除坐标系外, 用户无论处于什么位置, 当且仅当距离所在象限的 U_k 最近, 这意味着在没有其他用户干扰情况下所在象限 U_k 提供的速率最优^[20]。但由于受遮挡、 U_k 剩余速率不

同、存在水平切换等原因的影响^[21], 用户在接入或切换 VLC 网络时, 未必会接入用户所在象限的 U_k 。故接入前首先依据用户位置计算 U_k 在用户位置处的速率, 然后判断用户及 U_k 所在象限, 考虑是否遮挡, 最后为用户接入合适的网络。流程如图 2 所示。

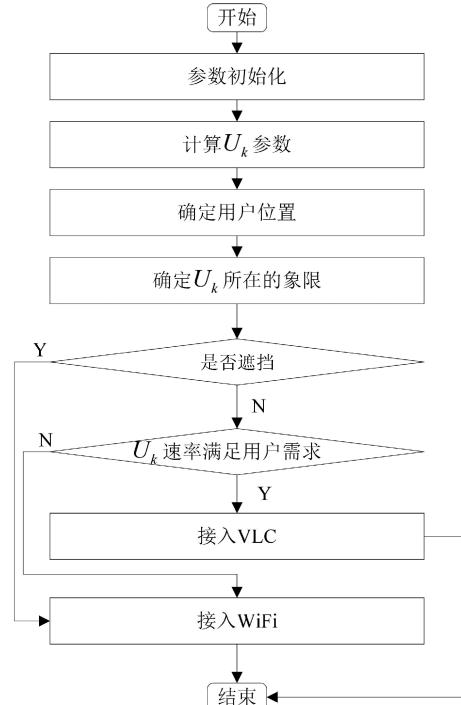


图 2 接入流程图

VLC 利用发光二极管来实现可见光链路通信, 系统采用朗伯光照模型, 控制器连接 4 个 LED 阵列和 WiFi 收发器, 负责资源分配。LED 灯经过调制可以将电信号转化为光信号, 在接收端装有 PD。每个 LED 阵列作为一个 VLC 接入点(access point, AP)。由于可见光通信中上行传输过于困难, 可行性较低, 故上行数据采用 WiFi 传输, 下行数据通过 VLC 链路传输。在实际通信过程中, 首先建立用户切换矩阵 N , 其次在资源控制器中输入用户所处位置, 然后计算 VLC 速率, 随即和 WiFi 速率比较, 最后接入合适的网络中。由于用户在接入网络时会受遮挡、速率以及自身位置的影响, 所以依据式(12)为用户接入合适的网络。

式(12)中 I_{in} 为接入结果, V_e 为用户速率需求。当 I_{in} 值为 1~4 时为用户接入对应的 VLC 通信中; 当 $I_{\text{in}} = 5$ 时代表 VLC 速率未达到用户需求或 VLC 信道被遮挡, 此时为用户接入 WiFi 网络中。将结果计入矩阵 N 中。

$$I_{\text{in}} = \begin{cases} 1, & V_e < V_i \& \& p \geq 0.2 \\ 2, & V_e < V_i \& \& p \geq 0.2 \\ 3, & V_e < V_i \& \& p \geq 0.2, i = (1, 2, \dots, 10) \\ 4, & V_e < V_i \& \& p \geq 0.2 \\ 5, & V_e > V_i \& \& p \leq 0.2 \end{cases} \quad (12)$$

4 基于 HAHSS 算法的混合切换模型构建

VLC-WiFi 异构组网存在乒乓效应严重影响用户上网体验。HAHSS 算法应用迟滞的思想,将内向切换与外向切换阈值差异化,设置不同的切换阈值,令切换操作存在一定的弹性空间从而抑制乒乓效应的发生。在设定阈值时考虑到小区间干扰与扩大系统吞吐量的因素,设定用户更倾向于连接自身所在象限 U_k ,当自身所在象限 U_k 速率不足或被遮挡时则倾向连接 WiFi 网络以此来尽可能降低小区间干扰。

HAHSS 算法规定:当速率大于本小区 VLC 通信速率的 120% 时为明显高于;为了避免小区间干扰,让用户更倾向于接入 WiFi,所以设定当速率小于 85% WiFi 速率时为明显低于。HAHSS 算法首先更新用户速率需求以及每组 U_k 剩余速率容量,其中后者以上一秒剩余状态为准。在垂直切换中,更新用户位置处 U_k 速率、 U_k 象限号、是否遮挡等信息,遮挡则切换至 WiFi,随后比较 U_k 与 WiFi 的速率值大小,当 VLC 速率较大时,用户向内切换至速率最优的 VLC 网络,随即 U_k 刷新速率,为下一次切换做好准备。当用户处于 VLC 网络且速率明显慢于 WiFi 网络或处于 VLC 覆盖区域之外时,为用户向外切换至 WiFi 网络。相反只要 VLC 通信比 WiFi 网络提供的速率快时,则用户向内切换至 VLC 通信网络。

在水平切换中设用户所在象限为 N_{ei} ,由式(13)找出用户连接本身所在象限时的位置。

$$U_{kzi} = \text{find}(N_{ri} == N_{ei}), i = (1, 2, \dots, 10) \quad (13)$$

find 为查找函数,当用户所在象限 N_{ei} 与 U_k 所在象限 N_{ri} 相同时,输出所在象限位置 U_{kzi} 。当其他 3 个象限 VLC 通信小区的速率明显高于用户接入本象限小区提供的速率时,则向速率更高的小区执行水平切换操作;当其他 3 个象限的 VLC 小区通信速率只是略高于用户接入本象限小区提供的速率时,则保持现有通信,不执行任何切换操作;相反只要本象限小区速率高于其他 3 个象限的 VLC 通信速率,则用户设备立刻切换至本小区。流程如图 3 所示。

HAHSS 算法站在用户角度具体可以将切换情况分为以下两类:

当用户连接 WiFi 网络时:

由式(14)找出最大速率以及 U_k 所在象限。

$$\begin{cases} V_{pre} = \max(1.2V_{U_{kzi}}, V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}, V_{WiFi}) \\ U_{pre} = \max(1.2V_{U_{kzi}}, V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}, V_{WiFi}), \quad i = (1, 2, \dots, 10), k = (1, 2, \dots, 4) \end{cases} \quad (14)$$

式中: V_{pre} 返回最大速率值, U_{pre} 返回最大速率值对

应象限号, $V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}$ 为其他三象限 U_k 的通信速率。由式(15)为用户切换合适的网络。

$$I_{inWi} = \begin{cases} U_{pre}, \quad V_e < V_i \& \& p \geq 0.2 \& \& U_{pre} \neq 5 \\ 5, \quad \quad \quad V_e > V_i \& \& p \geq 0.2 \& \& U_{pre} = 5 \end{cases}, \quad i = (1, 2, \dots, 10) \quad (15)$$

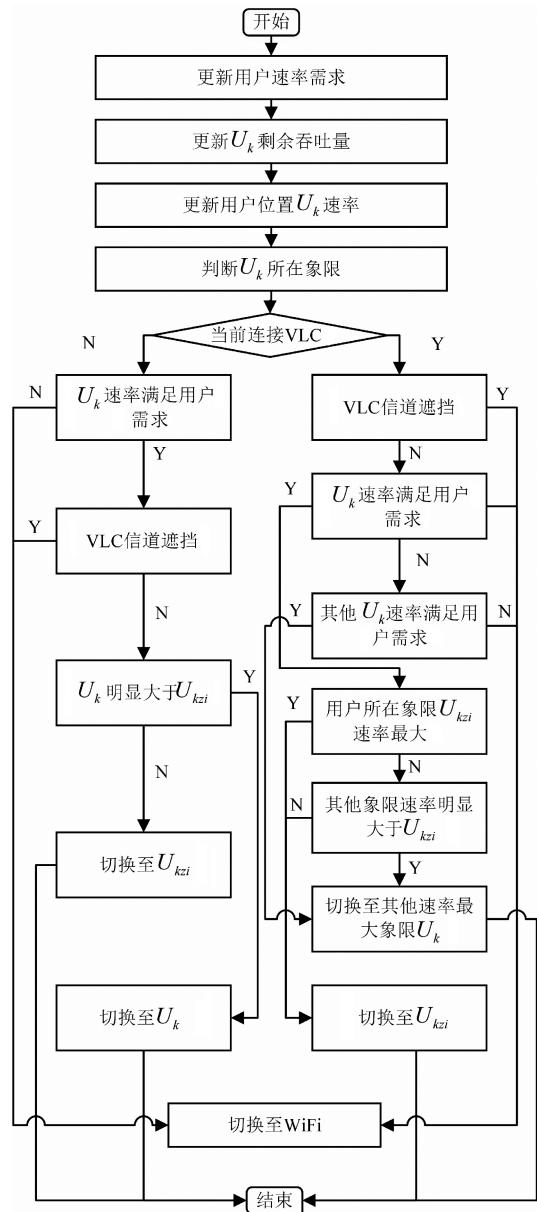


图 3 切换流程图

式中: 用户满足当前使用是 WiFi 网络、速率最大不是 WiFi、 U_k 速率大于用户速率需求即用户速率需求能被满足且 VLC 链路不被遮挡时,为用户切换至 U_{pre} 象限。

当用户连接 VLC 网络时:由式(16)找出最大速率及其所在象限。

$$\begin{cases} V_{pre} = \max(1.2V_{U_{kzi}}, V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}, 0.85V_{WiFi}) \\ U_{pre} = \max(1.2V_{U_{kzi}}, V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}, 0.85V_{WiFi}), \quad i = (1, 2, \dots, 10), k = (1, 2, \dots, 4) \end{cases} \quad (16)$$

式中: V_{pre} 返回最大速率值, U_{pre} 返回最大速率值对应象限号, $V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}$ 为其他三象限 U_k 提供速率。由式(17)找出其他三象限中最大速率 V_{3pre} 以及所在象限 U_{3pre} 。

$$\begin{cases} V_{3pre} = \max(V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}) \\ U_{3pre} = \max(V_{U_{k1}}, V_{U_{k2}}, V_{U_{k3}}), \quad i = (1, 2, \dots, 10), \\ k = (1, 2, \dots, 4) \end{cases} \quad (17)$$

在已知最大速率及其象限位置和用户所在象限 U_{kzi} 情况下,由式(18)为用户切换至合适的网络。

用户当前使用的是 VLC 通信,式(18)切换具体情况如表 1 所示。

$$I_{inVLC} = \begin{cases} U_{pre}, & V_e < V_i \& \& p > 0.2 \& \& U_{pre} \neq U_{kzi} \neq 5 \\ U_{pre}, & V_{U_{kzi}} > Ne \& \& U_{kzi} = U_{pre} \& \& V_{U_{kzi}} > 0.85V_{WiFi} \& \& p > 0.2 \\ U_{3pre}, & V_{3pre} > V_i \& \& U_{kzi} = U_{pre} \& \& V_{U_{kzi}} < 0.85V_{WiFi} \& \& p > 0.2 \\ 5, & \text{其他} \end{cases}, \quad i = (1, 2, \dots, 10) \quad (18)$$

表 1 切换结果

切换条件	接入象限
U_k 速率大于用户速率需求;	
不被遮挡;	U_{pre} 象限
速率最大象限不是用户所在象限且不是 WiFi;	
所在象限速率能满足用户速率需求;	U_{pre} 象限
所在象限速率大于 85% WiFi 速率;	即用户
不被遮挡;	所在象限 U_k
用户所在之外三象限 U_k 速率能满足用户速率需求;	所在之外
所在象限 U_k 速率小于 85% WiFi 速率;	三象限速率最大的 U_k
不被遮挡;	
其他情况;	WiFi 网络

5 VLC-WiFi 混合网络接入、切换流程实现

在 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的室内空间中,用户位置与速率随机生成然后接入网络。四象限分割接入和切换的流程如下。

5.1 接入流程

- 1) 初始化用户编号 i 、VLC 剩余容量 V_{max} ;
- 2) 式(10)计算用户所在象限 U_k 在用户位置处提供的速率;式(5)计算 U_k 所在象限;
- 3) 判断用户连接 VLC 通信是否会发生遮挡,是接入 WiFi,无遮挡转流程 4);
- 4) 判断此处 U_k 提供速率是否满足用户需求,满足接入 U_k ,不满足接 WiFi 通信;
- 5) 输出接入结果,更新 VLC 剩余容量 V_{max} , $i + 1$ 转流程 1)计算下一个用户接入。

5.2 切换流程

- 1) 更新用户速率需求,更新每组 U_k 剩余速率吞吐量以上一次连接状态为准;
- 2) 判断用户所在位置、 U_k 象限号以及当前接入网络,当前接入 WiFi 网络转流程 3),当前接入 VLC 转流程 6);

3)由式(13)找出用户所在象限 U_{kzi} ,式(14)计算找出速率最大值 V_{pre} 及其位置 U_{pre} ;

4)依据上述信息,由式(15)为用户切换合适的网络 I_{inWi} ;

5)刷新 VLC 剩余容量 V_{max} ;转流程 1);

6)由式(13)找出用户所在象限 U_{kzi} ,式(16)找出用户所在之外三象限最大速率值 V_{3pre} 及其所在象限号 U_{3pre} 。

7)由式(16)找出最大速率 V_{pre} 以及所在位置 U_{pre} 。

8)参考速率、位置、遮挡等信息由式(18)为用户接入合适的网络 I_{inVLC} ;

9)找到并接入其他三组提供速率最大的 U_k ,并刷新 VLC 剩余容量 V_{max} ;转流程 1)。

6 实验仿真分析

选取体积为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 室内空间的容积作为仿真测试空间,以房间地板中心为原点建立坐标系,将房间内部空间按象限分割为 4 部分,设置 4 个 LED 灯分别置于对应四象限天花板中心。使用 HAHSS 算法仿真接入,设置 PD 有效接受面积为 1 cm^2 。仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

参数	数值
房间大小	$5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$
光滤波器增益 T_s	1
LED 灯发光强度	0.73cd
接收视野角	60°
VLC 最大速率吞吐量/(Mbit \cdot s $^{-1}$)	500
WiFi 最大速率吞吐量/(Mbit \cdot s $^{-1}$)	128
接受平面高度/m	1

6.1 速率仿真对比分析

路由器最高速率 1 Gbps, VLC 最大速率吞吐量为 500 Mbit/s, WiFi 最大速率吞吐量 128 Mbit/s, 设定用户数为 10, 连续统计 100 s HAHSS 算法下用户的速率变化情况,如图 4 所示。HAHSS 算法优先为用户接入 VLC 通信,为用户提供更快的通信服务, WiFi 作为候补网络。当 VLC 信道被遮挡或因接入用户太多导致速率不够时,为用户接入 WiFi 网络,保证通信畅通。由图 4 可知,在仿真中用户平均速率约为 33.24 Mbit/s, VLC 平均速率约为 213.50 Mbit/s, WiFi 平均速率约为 119.54 Mbit/s, VLC 速率高于 WiFi 速率高于用户需求速率,在单用户情况下 VLC 通信与 WiFi 通信均能满足用户速率需求,但 VLC 通信速率更快。HAHSS 算法在保证用户通信畅通的前提下,可以有效的利用 WiFi 网络所不具备的 VLC 高速率优势,在提高用户的满意度、扩大系统吞吐量方面均优于单一 VLC 或 WiFi 通信。

6.2 吞吐量分析

对 VLC-WiFi 异构网络系统进行吞吐量变化分析,比

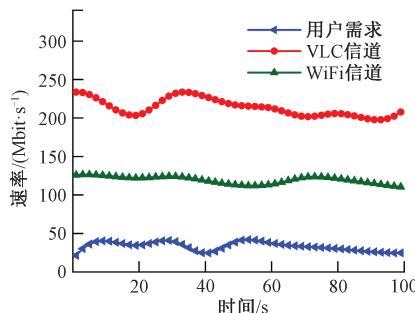


图 4 速率对比图

较 HAHSS 算法与传统算法下系统吞吐量的变化,如图 5 所示。图 5 记录了用户平均每百次吞吐量,记录前取平均值处理数据,避免出现极端数据、不合理数据。由图可见,在相同的用户情景下,HAHSS 算法用户平均吞吐量基本高于传统算法,其中第 5 次平均吞吐量略低于传统算法是由于 HAHSS 算法以牺牲小幅度吞吐量为代价换取大幅降低用户切换次数。在第 5 次切换中,HAHSS 算法下用户切换 4 次,传统算法下用户切换 12 次,在保证用户速率需求,不影响用户通信前提下大幅度降低用户设备切换次数,提升满意度。其他切换情况中,HAHSS 算法在兼顾降低切换次数与乒乓效应的前提下,仍能保证一定的吞吐量优势。仿真表明,HAHSS 算法可以显著的增加系统吞吐量,缓解 WiFi 频谱匮乏问题。

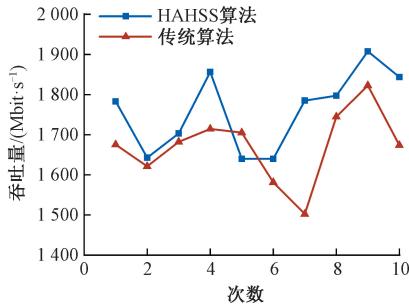


图 5 吞吐量

网络中接入用户数目与系统吞吐量的关系如图 6(a)中所示,图中第 1 个点为 10 个用户时系统的吞吐量。由图可知,随用户数目的增加系统吞吐量也在增加,且 HAHSS 算法下的系统吞吐量始终略高于传统算法下的系统吞吐量。在用户数增加到 22 人时 VLC 剩余带宽紧缺,系统吞吐量增幅开始减缓。在用户数目增加到 28 人时,HAHSS 算法系统吞吐量比传统算法提升约 5.84%。图 6(b)为用户数目与人均吞吐量的关系,由图可知随用户数目增加,人均吞吐量在逐渐减小且 HAHSS 算法下人均吞吐量始终小于传统算法下的人均吞吐量。图 6(c)为 VLC 接入人数随用户数目增加的变化曲线,由图可知随着用户数目增加,使用 VLC 通信人数也在增加,且 HAHSS 算法下 VLC 接入人数始终高于传统算法下的接入人数。在用户数目增加到

22 人时,受 VLC 系统带宽紧张的影响,VLC 接入人数开始出现减缓趋势。结合图 6(b) HAHSS 算法下人均吞吐量小于传统算法下人均吞吐量,由此可充分说明在用户速率需求能被满足前提下,HAHSS 算法比传统算法更有效的利用 VLC 通信的高速率优势。

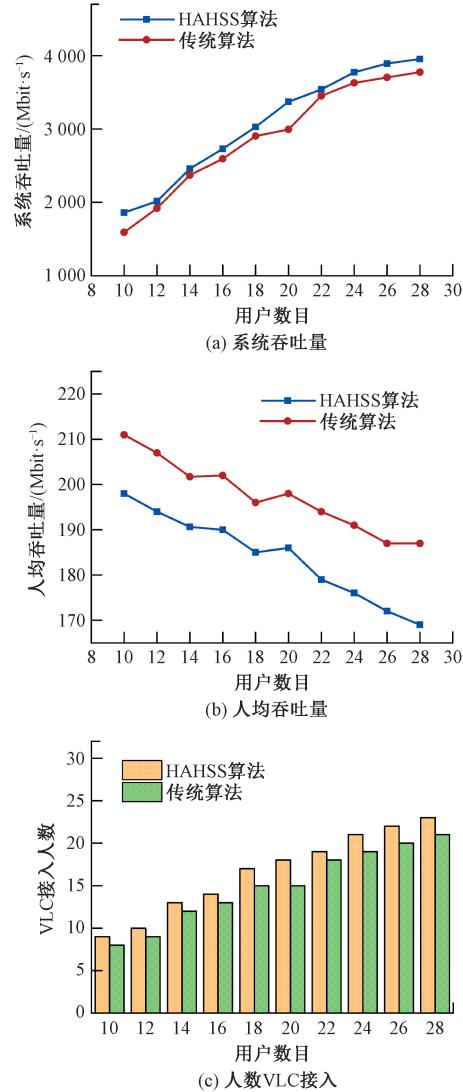


图 6 用户数目对吞吐量的影响

6.3 遮挡与切换仿真分析

在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 室内空间内,对 HAHSS 算法下异构网络进行仿真,分析其与传统算法的遮挡与切换次数情况。切换分垂直切换与水平切换,仿真结果如图 7 所示。在连续 1 000 次统计过程中,HAHSS 算法每 100 次平均切换 7.3 次,传统算法每 100 次平均切换 13 次,HAHSS 算法同比传统算法切换次数降低 43.84%,切换次数明显低于传统算法,网络稳定程度和用户体验质量会明显优于传统算法。由此说明 HAHSS 算法所提迟滞软切换方案在抑制用户切换方面更具优势。另一方面,传统算法因为遮挡或速率问题发生垂直切换次数远高于 HAHSS 算法,这会

间接影响用户水平切换,挤压水平切换空间,导致在实际统计中传统算法水平切换数据偏低,所以 HAHSS 算法同比传统算法切换次数降低百分比数据理应更高,实际数据偏低。

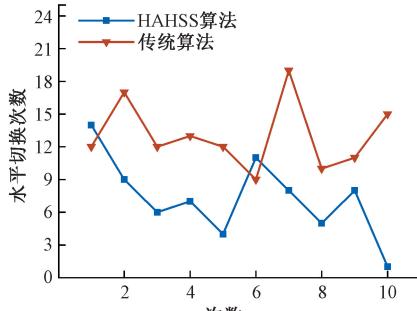


图 7 水平切换

HAHSS 算法和传统算法的垂直切换次数如图 8 所示。传统算法平均每百次遮挡 19.2 次, HAHSS 算法平均每百次遮挡 10.4 次, 同比下降 45.3%。在遮挡概率 p 均是 20% 情况下, HAHSS 算法切换阈值向外拓延, 在保障用户速率需求前提下使得切换次数大幅度减少。用户切换时更倾向于垂直切换连接到 WiFi 当中, 但尽管如此, HAHSS 算法下发生垂直切换的次数依旧远低于传统算法。由此表明 HAHSS 算法兼容性更高, 在抑制用户切换方面更有优势。

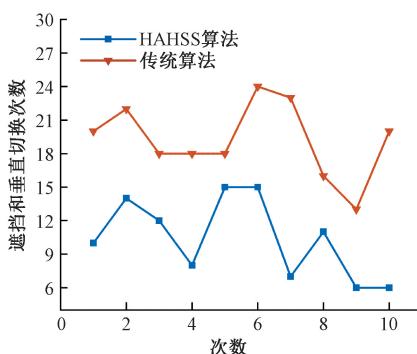


图 8 遮挡及垂直切换

6.4 乒乓效应仿真分析

在 HAHSS 算法中应用迟滞思想延缓用户向外切换以此抑制乒乓效应, 在保证用户速率的前提下对异构网络中存在的乒乓效应进行仿真, 仿真结果如图 9 所示。图 9(a) 中传统算法每 100 次切换发生 1.5 次乒乓效应, HAHSS 算法每百次发生 0.9 次乒乓效应, 相比下降 40.0%。在仿真中信道遮挡会影响到乒乓效应, 传统算法下用户被遮挡次数明显多于 HAHSS 算法。图中第 1 s 切换过程中 HAHSS 算法乒乓次数大于传统算法乒乓次数, 这是在原传统算法中用户本在即将发生乒乓效应情况下, 由于遮挡影响, VLC 信道直接被中断导致接入 WiFi 网络中, 因此未发生乒乓效应。图 9(b) 中传统算法每 100 次切换发生 2.9

次乒乓效应, HAHSS 算法每百次发生 1.2 次乒乓效应, 相比下降 58.62%。由于 VLC 信道存在遮挡问题以及用户更倾向于向外切换至 WiFi, 因此垂直乒乓的发生频率比水平乒乓更为频繁。图 9(c) 为二者总乒乓次数对比图, 传统算法每百次切换发生 4.4 次乒乓效应, HAHSS 算法每百次发生 2.1 次乒乓效应, 相比下降 52.27%。由图可见 HAHSS 算法总乒乓数明显低于传统算法, HAHSS 算法在抑制乒乓效应方面效果更优, 稳定性更高, 用户可以获得更好体验。

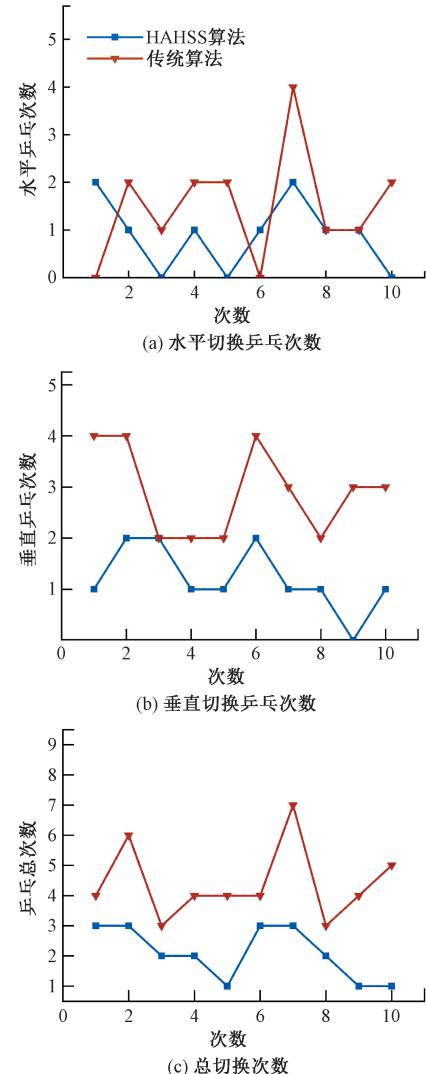


图 9 乒乓次数

7 结 论

本文提出了一种 VLC-WiFi 异构网络四象限分割接入及迟滞软切换算法, 利用 WiFi 作为补充网络, 缓解 VLC 上行链路困难以及被遮挡的问题。采用象限分割的思想, 首先计算房间内速率分布, 然后依据用户位置以及速率需求为用户接入网络, 考虑到遮挡、乒乓效应等问题, 设计遮挡

函数,采用迟滞软切换算法,将切换阈值差异化,令其存在一定的弹性空间来抑制乒乓效应。在 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 区域内仿真结果表明:本文设计的室内 VLC-WiFi 异构组网方案水平切换次数降低 43.8%,遮挡及垂直切换次数下降 45.3%,乒乓次数下降 52.27%。由此可见,VLC-WiFi 异构网络四象限分割接入及迟滞软切换算法稳定性更高,在抑制乒乓效应、降低切换次数方面更具有优越性。本文研究内容为 VLC-WiFi 异构网络提供了理论支撑。

参考文献

[1] 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):193-201.

[2] MA W, ZHANG L, JIANG Y. Optimized joint LiFi coordinated multipoint joint transmission clustering and load balancing for hybrid LiFi and WiFi networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(8): 227-238.

[3] AHMAD R, SOLTANI M D, SAFARI M, et al. Reinforcement learning based load balancing for hybrid LiFi WiFi networks [J]. IEEE Access, 2020: 132273-132284.

[4] 刘期烈,李子炎,徐勇军,等.基于最大最小公平性的异构 VLC/RF 网络资源分配算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2022,34(2):269-276.

[5] 朱福荣,杨立伟,刘鑫来,等.可见光通信与 WiFi 异构网络资源调度算法的优化[J].通信技术,2021,54(7): 1665-1669.

[6] 卢钰松,蔡喜平,胡延静,等.基于多探测器融合的非视线链路通信系统研究[J].电子测量技术,2023,46(3): 46-52.

[7] 陈勇,胡陈毅,刘焕淋,等.基于可见光通信的 LED 布局与功率分配的同步优化[J].光学学报,2023, 43(14):1406002.

[8] 张慧颖,王凯,于海越,等.基于自适应 Levy 飞行的黄金正弦可见光定位研究[J].激光技术,2022,46(4): 519-524.

[9] JARCHLO E A, ESO E, DOROUD H, et al. Li-Wi: An upper layer hybrid VLC-WiFi network handover solution[J]. Ad Hoc Networks, 2022, 124: 102705.

[10] 刘焕淋,张彤,陈勇,等. VLC-WiFi 异构网络 QoS 感知的跨层动态资源分配[J].电子与信息学报,2022, 44(10):3516-3523.

[11] 张慧颖,于海越,陈玲玲.基于反向学习策略的自适应花授粉接收信号强度指示室内可见光定位[J].中国激光,2021,48(1):96-106.

[12] 秦岭,郝雅楠,杜永兴,等.强背景光下 LED 交通灯的可见光通信误码率分析[J].电子测量与仪器学报, 2017,31(5):676-681.

[13] 曹凡.室内 MIMO 可见光通信系统信道建模仿真与实测性能分析[D].南昌:南昌大学,2022.

[14] LIU H, YANG S, CHEN Y, et al. Resource allocation based on differentiated user services for indoor hybrid multi-color VLC/WiFi networks [J]. Optics Communications, 2023, 530: 129072.

[15] 杨立伟,贾博宇,王芳,等.可见光与 WiFi 异构网络资源管理算法研究[J].计算机工程,2023, 49(3):203-210,220.

[16] 蒲欣.室内 VLC-WiFi 异构网络的下行链路资源分配方案[D].重庆:重庆邮电大学,2021.

[17] 王邵强.室内 VLC 与 WiFi 异构网络切换算法研究[D].长春:长春理工大学,2022.

[18] 马成宇,张慧颖.融合可见光的室内异构网络接入点选择研究[J].无线互联科技,2023,19(2):150-152.

[19] 杨立伟,王志立,赖文聪,等.一种用于优化 VLC/WiFi 异构网络资源的动态比例公平算法[J].光通信技术, 2023,47(5):1-5.

[20] 刘星辰,王利民,张帅,等.室内可见光通信的脉冲响应及矢量编码算法模型[J].电子测量技术,2022,45(2): 65-71.

[21] 槐利,张敏娟,林清,等.一种基于白光 LED 的室内通信方法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(6):13-17.

作者简介

张慧颖(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为光通信技术及应用、可见光通信、检测技术等。
E-mail:yingzi1313@163.com