

## 室内 Li-Fi 和 RF 混合网络中接入节点分配方法

王旭东,张思雨,李卓龙,吴楠<sup>†</sup>

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

**摘要:**针对室内可见光无线通信(Li-Fi)与射频(RF)无线通信混合网络切换即接入节点(AP)分配问题,基于用户位置和用户数量随机改变的动态应用场景,引入依据转换阈值为用户确定服务 AP 的思想,在考虑交接负载的条件下,提出了动态转换阈值和最小数据率约束两种改进的 AP 分配方法.仿真实验表明,在相同应用场景下,相比固定阈值的 AP 分配方法,提出的两种方法在中断概率性能方面分别改善 4.66%和 8.50%;并且其 1%中断数据率分别提高 3.21 Mb/s 和 9.09 Mb/s.此外,仿真分析表明数据率要求和随机生成用户数量上限能够显著地影响系统的中断概率性能.

**关键词:**Li-Fi;混合网络;接入节点;中断概率

**中图分类号:**TN929.1

**文献标志码:**A

## Access Point Assignment Method for Indoor Li-Fi and RF Hybrid Networks

WANG Xudong, ZHANG Siyu, LI Zhuolong, WU Nan<sup>†</sup>

(Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** Access point assignment for indoor Li-Fi and Radio Frequency (RF) hybrid networks is studied. Based on the dynamic application scenario with the movement of users and the changes in the number of users, a conversion threshold is introduced to determine the allocation of APs. Two improved methods of AP allocations, dynamic threshold and minimum data rate constraint, are proposed under the condition of considering the handover overhead. The experimental results show that in the same application scenario, the proposed AP allocation methods improve the outage probability performance by 4.66% and 8.50%, respectively, and improve 1% outage data rate by 3.21 Mb/s and 9.09 Mb/s, respectively, when compared with the AP allocation method with fixed threshold. In addition, the simulation analysis shows that the data rate requirements and the maximum number of randomly generated users can significantly affect the outage probability performance.

**Key words:** Li-Fi; hybrid networks; Access Point (AP); outage probability

近年来射频(Radio Frequency, RF)通信网络面临着不断增长的技术需求,现有技术难以满足高速

率和大容量的技术需要,解决这个问题需要寻求新兴技术.可见光通信(Visible Light Communications,

\* 收稿日期:2018-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61371091), National Natural Science Foundation of China(61371091)

作者简介:王旭东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,大连海事大学教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: wu.nan@dlnu.edu.cn

VLC)具有传输数据率高、频谱资源丰富、绿色安全等优点,得到了越来越多的关注<sup>[1-2]</sup>.近年来,VLC网络通信则成为VLC技术领域的研究热点之一<sup>[3-4]</sup>.在一个室内场景中,利用现有的LED照明设施可以构建微小覆盖区域的蜂窝,每个照明光源可以作为蜂窝的接入节点(Access Point, AP)服务覆盖区域内的多个用户,这种类型的网络被称为Li-Fi网络<sup>[5]</sup>.虽然Li-Fi网络能够提供较高的数据率性能,但是由于网络中光线容易被遮挡,会造成中断概率较高的情况.而RF网络能够以较低的数据率在较大的空间进行通信.将Li-Fi网络和RF网络结合,可以充分利用各自特性实施互补,显著地提高用户的数据率性能和中断概率性能,实现全方位无缝覆盖<sup>[6-8]</sup>.

针对Li-Fi与RF网络融合的组网方案已有学者进行了研究.文献[9]提出了在VLC网络下引入RF网络,获得了VLC网络数据率性能的显著提高,但是文中假设VLC的系统资源是固定的,在系统运行过程中,用户位置保持不变,大大简化了实际应用情况.文献[10]针对室内VLC-WiFi异构网络的特点,提出了一种基于切换间隔和运动趋势的动态驻留时间算法,在不增加乒乓效应的前提下提高了系统的命中率.文献[11]提出了一种混合Li-Fi和RF室内网络的动态负载平衡方案,主要研究了AP选择的问题并提出了一个转换阈值的概念,用户连接到Li-Fi网络中的数据率高于转换阈值则被分配到Li-Fi AP上,反之,就分配到RF网络中去.文献中尽管考虑了用户位置是随机移动的,但却假设用户的数量保持不变,而在实际的商场等室内场景里,用户的数量也是不断变化的.

本文针对室内Li-Fi和RF构建的混合网络切换即AP分配问题进行研究,考虑用户数量是随机改变的,且位置是随机移动的实际应用场景,提出动态转换阈值和最小数据率约束两种AP分配方法.以固定转换阈值的AP分配方法作为参照方法,分析不同方法对系统中断概率和用户数据率性能等的影响.

仿真实验表明,相比固定阈值的AP分配方法,本文提出的两种方法能显著提高混合系统的中断概率性能和用户数据率性能.

## 1 系统模型

### 1.1 系统设置

考虑室内可见光通信应用场景,构建一个室内

Li-Fi和RF的混合网络模型,如图1所示.部署16个Li-Fi AP和1个RF AP,每个Li-Fi AP由多个LED构成,假设所有的光电检测器(Photoelectric Detector, PD)均是垂直向上面天花板,则光传输链路的人射角等于辐射角.每个Li-Fi AP覆盖一个有限的区域,称为一个attocell网络<sup>[5]</sup>,Li-Fi attocell重叠区域内的Li-Fi用户会受到同信道干扰(Co-Channel Interference, CCI),除此之外,所有的Li-Fi AP均复用相同的频带.后续的研究考虑同信道干扰的影响.



图1 室内Li-Fi和RF的混合网络模型图

Fig.1 Illustration of hybrid Li-Fi and RF networks

在本文构建的网络模型中,用户均匀分布在覆盖区域内.为了更好地利用Li-Fi提供的频谱资源,具有较高光信道增益的用户由Li-Fi AP提供服务,具有较低光信道增益的用户由RF AP提供服务.由于接收机的移动,Li-Fi和RF通信链路的信道状态信息(Channel State Information, CSI)都会随之改变,因此,在一段时间间隔内需要重新为用户分配资源.假设用户的CSI呈缓慢变化,即短时间内CSI保持不变.因此,系统的工作进程可以划分为多个很短时间段的工作状态.进一步假设存在一个中心单元(Center Unit, CU)能够监控系统状态信息,在一个时间间隔 $T_p$ 内,系统的状态信息将保持不变.时间间隔 $T_p$ 就被定义为一个状态,用自然数 $n$ 来表示状态的序号,所有用户从中央单元接收资源分配的结果,以恒定的数据率接收AP的信号.系统的工作时间为 $T_s$ ,工作状态数为 $N_s$ .

由于用户的移动,在两个相邻的状态之间,当用户由两个不同的AP提供服务时,会发生一次交接,因此在模型中,需要考虑交接负载.并且,在本文提出的应用场景模型中,充分考虑了室内环境中用户

数量随机变化,根据用户随机移动的具体情况,引入了一个适应于用户数量和状态不断变化的负载平衡算法。

为了合理利用混合网络资源,模型中引入了一个转换阈值,记为  $\gamma$ 。若用户接入 Li-Fi 网络中的数据率高于转换阈值  $\gamma$ , 则该用户被分配到 Li-Fi AP; 否则,分配到 RF AP。此外,为了确保系统具有一定的性能,混合系统对用户每个状态都有一个数据率要求,表示为  $\Lambda$ 。在系统工作时间内,用户在每个状态的数据率要高于该数据率要求,否则,认为用户在该状态下处于中断状态。

## 1.2 Li-Fi 信道模型

为了估计一个指定光节点和用户之间的信道链路增益,需要计算路径损耗。本文只考虑光通过视距 (LOS) 传播情况,可以通过直流信道增益来对 LOS 链路建模,光节点和目标用户之间直流增益为<sup>[12]</sup>:

$$H = \frac{A_p(m+1)}{2\pi(r^2+h^2)} g_t g_c(\theta) \cos^m(\phi) \cos(\theta), 0 < \theta < \psi \quad (1)$$

式中:  $m$  为朗伯辐射级数,由  $m = -\ln(2)/\ln(\cos(\phi_{1/2}))$  来决定,  $\phi_{1/2}$  为 LED 的半功率辐射角;  $A_p$  为接收机 PD 的有效接收面积;  $r$  为用户和光节点之间的水平距离;  $h$  为用户和光节点之间的垂直距离;  $\phi$  为光辐射角;  $\theta$  为对应的光入射角;  $g_t$  为光学滤波器增益;  $g_c(\theta)$  为光学聚焦器增益。假设光源的半功率辐射角  $\phi_{1/2}$  为  $60^\circ$ , 这是分布式照明模型中的典型值; 接收机的视场角  $\psi$  为  $90^\circ$ 。

在一个 Li-Fi 系统中,LED 工作在线性区域,输出光功率与输入电压成比例,采用强度调制和直接检测的方法来保证只有正、实值信号传输到接收端。一个 DC 直流偏置电压  $x_{DC}$  被添加到调制电信号上,信号的平均电功率和平均光功率之间的转换符合关系  $\iota = P_{opt}/\sqrt{P_t}$ <sup>[13]</sup>,  $\iota$  定义为直流偏置因子,其中  $P_{opt}$  是 Li-Fi AP 的平均光功率,与  $x_{DC}$  成比例关系;  $P_t$  是信号的电功率。对于给定一个用户  $u$  连接到 Li-Fi 第  $a$  个 AP,其信号的信干比可表示为:

$$\text{SINR}_{u,a} = \frac{(\kappa P_{opt} H_{u,a})^2}{\iota^2 N_0 B_L + \sum (\kappa P_{opt} H_{u,else})^2} \quad (2)$$

式中:  $\kappa$  为接收端的光电转换效率;  $B_L$  为 Li-Fi 网络的调制带宽,即 Li-Fi 网络接入点可用的频谱资源;  $N_0$  为噪声功率谱密度;  $H_{u,a}$  是用户  $u$  和 Li-Fi AP  $a$

之间的信道增益;  $H_{u,else}$  是用户  $u$  和干扰 Li-Fi AP 之间的信道增益。

此外,采用直流偏置光正交频分复用 (DCO-OFDM) 作为下行链路信息传输方案,确保实值信号被传输到接收端。因此,至少一半的子载波必须用来实现 Hermitian 对称性(共轭对称性),在状态  $n$  下仅有一半的带宽能够用来进行信号传输。香农容量被用来计算用户  $u$  和 Li-Fi AP  $a$  之间可获得的数据率,即有:

$$R_{u,a}^{(n)} = \frac{B_L}{2} \log_2(1 + \text{SINR}_{u,a}^{(n)}) \quad (3)$$

在本文中,采用时分复用 (TDMA) 的方法实现多用户接入,使用比例公平的调度算法<sup>[14]</sup>,由 Li-Fi AP 提供服务的用户共享平等的时间资源。

## 1.3 无线 RF 信道模型

将无线 RF 系统应用于室内通信场景的毫微微蜂窝系统建模为 WINNER II 信道模型,典型的路径损耗模型为<sup>[15]</sup>:

$$\text{PL} = A \log_{10}(d) + B + C \log_{10}\left(\frac{f_c}{5}\right) + X \quad (4)$$

式中:  $d$  为发送端到接收端的距离,单位 m;  $f_c$  为载波频率,单位 GHz;  $A$ 、 $B$  和  $C$  均为常量,其数值取决于通信模型。本文建模的室内场景中不考虑墙壁的间隔,RF 信道只考虑视距传输的情况,因此,选取  $A = 18.7$ ,  $B = 46.8$ ,  $C = 20$ ; 同时,在室内环境中受办公家具、仪器设备、人员流动等因素的影响,其在阴影效应中体现出来,设定  $X$  是阴影效应损耗,其为零均值标准差  $\sigma = 3$  dB 的高斯分布随机变量。由于 RF 和 Li-Fi 信道之间不存在干扰,且只部署一个 RF AP,则用户接收 RF AP 信号的信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 为:

$$\text{SNR} = \frac{P_R G_{des}}{P_n} \quad (5)$$

式中:  $P_R$  为 RF AP 的发送功率;  $G_{des}$  为路径增益,表达式为  $G_{des} = 10^{-\text{PL}/10}$ ;  $P_n = k_B T B_R$  为噪声功率,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  为周围环境的温度,  $B_R$  为 RF 网络的通信带宽。

假设为每个子载波平等分配电功率,为每个用户平等分配载波资源进行信号传输。在状态  $n$  时刻用户  $u$  和 RF 第  $a$  个 AP 间链路的数据率为<sup>[16]</sup>:

$$I_{u,a}^{(n)} = B_u \log_2(1 + \text{SNR}_{u,a}^{(n)}) \quad (6)$$

式中:  $B_u$  为 RF 系统中分配给用户  $u$  的带宽。使用比

例公平的调度算法,由 RF AP 提供服务的用户共享平等的带宽资源.

## 2 动态负载平衡方案

### 2.1 动态负载平衡算法思想

在一个动态系统中,用户在两个相邻的状态由两个不同的 AP 提供服务,会产生一次交接,在这个交接过程中,用户将无法接收到有效的数据信息,这就造成了频谱效率的损耗.考虑交接造成的频谱效率损耗更具有实际意义,交接分为 3 种情况:从 RF 到 Li-Fi AP、从 Li-Fi 到 RF、从 Li-Fi 到 Li-Fi.

室内网络中由交接产生的负载是毫秒级的<sup>[11]</sup>,这个损耗远小于两个状态之间的间隔时间  $T_p$ .可引入泊松分布来建模描述,即定义  $t_{ij}$  为从  $AP_i$  转换到  $AP_j$  的交接负载,则其满足  $\lambda = E[t_{ij}]$  的泊松分布.由于交接导致了 AP 和用户之间吞吐率的损耗,引入了两个状态之间的转换效率,表达式为:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{t_{ij}}{T_p}, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad i, j \in C_L \cup C_R \quad (7)$$

式中:  $C_L$  为 Li-Fi 的 AP 集合;  $C_R$  为 RF 的 AP 集合.交接负载的数据率为转换效率与通信链路数据率的乘积.

当系统正常工作时,在每个状态下,每个用户都会被分配到一个 Li-Fi 或者 RF AP 上.由于用户是随机移动的,房间中活跃用户的数量是随机的,分配给用户的 AP 会随着用户的位置和数量而改变.中心单元计算每个状态用户的 AP 分配结果.

文献[11]提出了一种基于用户位置随机改变的动态负载平衡算法,该算法的核心是依据固定转换阈值进行 AP 分配(Fixed Threshold,称为方法 FT).本文在此基础上,考虑系统中用户数量的随机改变.由于混合网络资源的高效利用,关键在于确定用户的服务 AP,为此,本文提出动态转换阈值(Dynamic Threshold,称为 DT 方法)和最小数据率约束(Minimum Data Rate Constraint,称为 MDRC 方法)等两种改进的 AP 分配方法.

Li-Fi 网络和 RF 网络中能为用户提供频带和功率等系统资源是固定的,因此两种网络中能够同时服务用户的数量是有限的,混合网络的重点是平衡两个网络中用户的数量.当网络中转换阈值为固定值时,如果阈值设定较低,则超过阈值的用户全部转换到 RF 网络,会造成 RF 网络过载;若阈值设定

较高,则大部分用户都被分配在 Li-Fi 网络中,会造成 Li-Fi 网络过载.因此,在一个用户数量不断变化的系统中,固定阈值不能保证系统性能.

本文提出的 DT 方法是根据用户数量动态确定最优阈值,可避免 Li-Fi 或 RF 网络严重过载.本文提出的 MDRC 方法中,在用户较少时,能保证 Li-Fi 网络中数据率小于系统数据率要求值的用户全部转换到 RF 网络中;在用户较多时,可将 Li-Fi 网络中数据率性能较差的用户转换到 RF 网络中,并限制 RF 网络中服务的用户数量不超过某确定数值.因此,本文提出的两种方法均能够更好地平衡 Li-Fi 和 RF 网络中用户的数量,为用户更合理地分配 AP.

### 2.2 AP 分配算法

设用户全集为  $U$ ,由 Li-Fi 提供服务的用户集合为  $U_L$ ,由 RF 提供服务的用户集合为  $U_R$ .  $N_L$  为集合  $U_L$  中用户的数量,  $N_R$  为集合  $U_R$  中用户的数量,  $s$  为随机生成的用户数量,  $a_u$  代表在  $n-1$  状态时为用户  $u$  分配的 AP.中心单元能够根据用户  $u$  与 Li-Fi 和 RF AP 之间的信道状态信息计算  $R_{u,a}^n$  和  $\Gamma_{u,a}^n$ .在每个状态下,为了充分利用 Li-Fi 网络较高的频谱资源,用户被优先分配到 Li-Fi AP 上.因此,状态初始值为:  $U_L = U, U_R = \{\emptyset\}, N_L = s, N_R = 0$ .

考虑交接负载的情况下,设使得用户  $u$  能够获得最高通信链路数据率的 Li-Fi AP 其标号为  $w_{L,u}$ :

$$w_{L,u} = \arg \max_{j \in C_L} \eta_{a_u, j} R_{u, j} \quad (8)$$

Li-Fi AP 上的用户平等地分配时间资源,每个用户可获得的光链路的数据率为:

$$\Omega_u = \eta_{a_u, w_{L,u}} \frac{R_{u, w_{L,u}}}{N_{w_{L,u}}} \quad (9)$$

其中  $N_{w_{L,u}}$  是由 Li-Fi AP  $w_{L,u}$  提供服务的用户个数.

在方法 FT 中,用户满足  $\Omega_u < \gamma$  条件被重新分配到 RF AP 上,其中转换阈值  $\gamma$  为固定值. RF AP 标号由  $w_{R,u}$  表示.在状态  $n$  的用户 AP 分配情况为:

$$a_u = \begin{cases} w_{L,u}, & \Omega_u \geq \gamma \\ w_{R,u}, & \Omega_u < \gamma \end{cases} \quad (10)$$

在 DT 方法中,中心单元根据用户数量动态地确定转换阈值  $\gamma_s$ .用户满足  $\Omega_u < \gamma_s$  条件被分配到 RF AP 上.在状态  $n$  的用户 AP 分配情况为:

$$a_u = \begin{cases} w_{L,u}, & \Omega_u \geq \gamma_s \\ w_{R,u}, & \Omega_u < \gamma_s \end{cases} \quad (11)$$

在 MDRC 方法中,转换阈值  $\gamma$  等于数据率要求值  $\Lambda$ .为了确定 RF 用户,中心单元从全部用户中找到数据率最小的用户  $\mu$ ,若该用户满足  $\Omega_u < \gamma$  且 RF

网络中服务的用户数量不超过 10 个( $N_R \leq 10$ )时,将其确定为 RF 用户. 由于 Li-Fi 网络中用户数量的减少, 用户潜在的数据率随之改变. 重新计算 Li-Fi 网络中剩余用户  $u$  的潜在数据率  $\Omega_u$  的值, 重复 MDRC 方法中步骤 7~14. 状态  $n$  下的用户 AP 分配情况为:

$$a_u = \begin{cases} w_{L,u}, \Omega_u \geq \gamma \\ w_{R,u}, \Omega_u < \gamma \ \& \ N_R \leq 10 \end{cases} \quad (12)$$

根据 AP 分配方法 FT、DT 或 MDRC 方法能够确定用户的服务 AP, 确定  $U_L$ 、 $w_{L,u}$  和  $U_R$ . 中心处理单元根据  $U_L$  和  $w_{L,u}$  将对应的用户连接到 Li-Fi 网络, 根据  $U_R$  将对应的用户连接到 RF 网络.

传统算法 FT 以及本文提出的两种算法 DT 和 MDRC 其执行流程分别总结如下.

#### FT 方法: 固定转换阈值的 AP 分配方法

1. 对于所有的用户  $u$ :
2. 计算所有用户  $u$  从原 AP  $a'_u$ , 转换到各个 Li-Fi AP 之间的转换效率  $\eta_{a'_u a}^{(n)}$ ;
3. 根据式(8)计算  $w_{L,u}$ ;
4. 根据式(9)计算用户潜在的 Li-Fi 数据率  $\Omega_u$ ;
5. 给定固定的转换阈值  $\gamma$ ;
6. 如果  $\Omega_u > \gamma$ :  
用户  $u$  由 Li-Fi AP  $w_{L,u}$  提供服务.
8. 否则:  
用户  $u$  由 RF AP 提供服务;
10.  $U_L = U_L - \{u\}, U_R = U_R \cup \{u\}$ ;
11.  $N_L = N_L - 1, N_R = N_R + 1$ .

#### DT 方法: 动态转换阈值的 AP 分配方法

1. 对于所有的用户  $u$ :
2. 计算所有用户  $u$  从原 AP  $a'_u$ , 转换到各个 Li-Fi AP 之间的转换效率  $\eta_{a'_u a}^{(n)}$ ;
3. 根据式(8)计算  $w_{L,u}$ ;
4. 根据式(9)计算用户潜在的 Li-Fi 数据率  $\Omega_u$ ;
5. 根据用户数量  $s$ , 确定对应的转换阈值  $\gamma_s$ ;
6. 如果  $\Omega_u > \gamma_s$ :  
用户  $u$  由 Li-Fi AP  $w_{L,u}$  提供服务.
8. 否则:  
用户  $u$  由 RF AP 提供服务;
10.  $U_L = U_L - \{u\}, U_R = U_R \cup \{u\}$ ;
11.  $N_L = N_L - 1, N_R = N_R + 1$ .

#### MDRC 方法: 最小数据率约束的 AP 分配方法

1. 对于所有的用户  $u$ :
2. 计算所有用户  $u$  从原 AP  $a'_u$ , 转换到各个 Li-

Fi AP 之间的转换效率  $\eta_{a'_u a}^{(n)}$ ;

3. 根据式(8)计算  $w_{L,u}$ ;
4. 根据式(9)计算用户潜在的 Li-Fi 数据率  $\Omega_u$ ;
5. 转换阈值  $\gamma$  等于数据率要求值  $\Lambda$ ;
6. 当  $N_L > 0$  时, 进入循环 loop:
7. 找到 Li-Fi 潜在数据率最小的用户记为用户  $\mu, \mu = \arg \min_{u \in U_L} \Omega_u$ .
8. 如果  $\Omega_u \geq \gamma$  或  $N_R > 10$ :
9. 跳出 loop 循环.
10. 否则:  
用户  $\mu$  由 RF AP 提供服务;
12.  $U_L = U_L - \{u\}, U_R = U_R \cup \{u\}$ .
13.  $N_L = N_L - 1, N_R = N_R + 1$ .
14. 重新计算 Li-Fi 网络中剩余用户  $u$  的潜在数据率  $\Omega_u$ .
15. 结束 Loop 循环.

#### 2.3 系统中断概率

根据 AP 分配方法, 状态  $n$  下为用户提供服务的 AP 可以被确定下来, 则用户  $u$  可获得的数据率为:

$$r_u^{(n)} = \begin{cases} \eta_{a'_u a} \frac{R_{u, a_u}}{N_{a_u}}, a \in C_L \\ \eta_{a'_u a} \frac{\Gamma_{u, a_u}}{N_R}, a \in C_R \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N_{a_u}$  为由 Li-Fi AP  $a_u$  提供服务的用户数量;  $N_R$  为由 RF AP 提供服务的用户数量. 给定混合系统中的数据率要求  $\Lambda$ , 系统的中断概率定义为系统中用户未达到数据率要求的状态占总工作状态的百分比, 表示为:

$$Z = \Pr(r_u^{(n)} < \Lambda), 1 \leq n \leq N_s \quad (14)$$

本文提出的模型中, 数据率要求和随机生成用户数量上限均可以显著地影响中断概率.

### 3 仿真结果和性能分析

本节利用蒙特卡洛仿真实验分析采用上述不同方法时混合网络中用户中断概率和数据率的性能.

#### 3.1 系统设置

假设仿真场景为  $24 \text{ m} \times 24 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  的空间, 室内覆盖了 16 个 Li-Fi AP 和一个 RF AP. 图 2 为仿真实验场景. 图 2 中实线部分为一个实现中随机生成用户在 20 个状态下的运动轨迹, 如不特殊说明, 默认随机生成用户数量上限为 30. 用户符合均匀分

布,以随机的速度在系统中移动,移动速度符合 0 ~ 2 m/s 的均匀分布;每个用户的移动方向每 5 个状态随机改变一次,移动方向的角度符合 0 ~ 2π 的均匀分布.当用户移动到房间边缘,用户会将移动方向更改为朝向房间中心区域,每 20 个状态就随机增加或减少不定数量的用户,仍保持用户的数量在 0 ~ 30 个.交接负载符合泊松独立同分布,交接负载的均值为 25 ms.混合网络中用户的数据率要求记为  $\Lambda$ ,如不特殊说明,数据率要求  $\Lambda$  为 30 Mb/s.方法 FT 中转换阈值设定为 20 Mb/s,其他仿真参数列在表 1 中.在仿真实验中,中断概率由动态系统中运行 5 000 次计算得到.

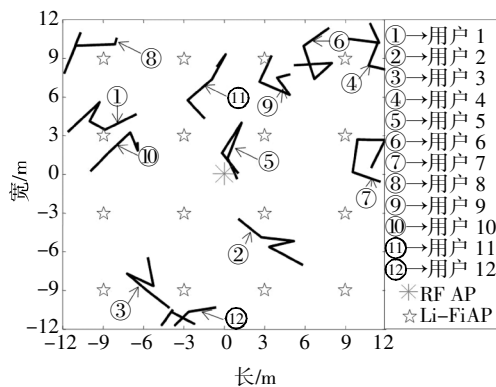


图 2 仿真实验场景  
Fig.2 Simulation scenario

表 1 仿真参数

Tab.1 Parameters for the simulation

物理量	意义	数值
$h/m$	用户和节点间垂直距离	2.15
$P_{opt}/W$	Li-Fi AP 的传输光功率	10
$B_l/MHz$	Li-Fi 网络的调制带宽	40
$A_p/cm^2$	PD 的接收面积	1
$g$	光滤波器增益	1
$g_c(\theta)$	光学聚焦器增益	2.25
$\kappa/(A \cdot W^{-1})$	光电转换效率	0.53
$\iota$	直流偏置因子	3
$N_0/(A^2 \cdot Hz^{-1})$	噪声功率谱密度	$10^{-21}$
$P_R/mW$	RF AP 的传输功率	10
$B_R/MHz$	RF AP 的传输带宽	20
$f_c/GHz$	RF AP 载波的中心频率	2.4
$T/K$	周围环境的温度	293.5
$T_p/ms$	资源分配的时间间隔	500
$T_s/min$	动态系统的工作时间	2

### 3.2 性能评估

对于混合网络资源配置算法对系统性能的影响可以通过以下实验进行评估.

**实验 1 转换阈值对中断概率的影响分析.**当系统模型中用户数量保持固定不变时,不同的转换阈值对系统的中断概率有较大的影响.图 3 给出了不同用户数量的系统中,转换阈值对中断概率性能的影响.数据率要求  $\Lambda$  为 30 Mb/s.不同用户数量的系统均存在一个最优的转换阈值,当阈值设定大于这个最优转换阈值时,由于 Li-Fi 网络过载会导致中断概率增加;当阈值设定小于最优转换阈值时,由于 RF 网络过载也会导致中断概率增加.此外,最优的转换阈值要小于数据率要求  $\Lambda$ .这是由于 Li-Fi 系统中数据率较低的用户转换到 RF 网络中后,由于 Li-Fi 中用户数量的减少,每个 Li-Fi 用户可分得的时间资源增加,那么用户所获得的数据率就远高于转换阈值.

根据转换阈值对中断概率性能影响的分析,可以得到不同用户数量下的最优转换阈值,对应结果如表 2 所示.对于 DT 方法,可以根据不同用户数量,选取对应的最优转换阈值作为转换阈值.

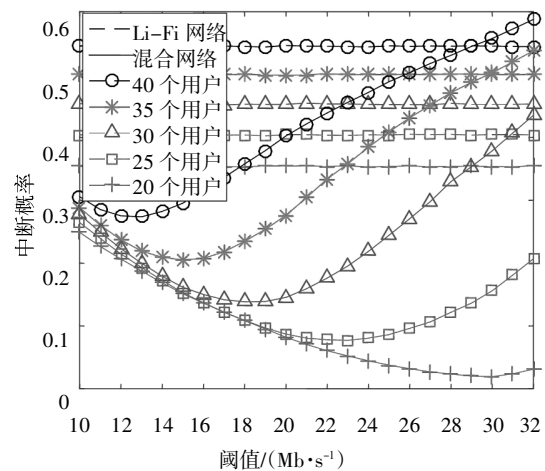


图 3 转换阈值对中断概率性能的影响

Fig.3 Outage probability against conversion thresholds

表 2 不同用户数量对应的最优转换阈值

Tab.2 Optical conversion thresholds against user numbers

用户数量	20	25	30	35	40	45	50	55	60
最优阈值 ( $Mb \cdot s^{-1}$ )	30	22	18	15	13	11	9	8	7

**实验 2 数据率要求对中断概率的影响分析.**当系统模型中用户数量随机变化时,选择一个固定的转化阈值无法使系统得到最优的性能.本文提出的两种 AP 分配的方法,相比于固定转换阈值的 AP 分配方法均改进了系统性能.此外,将不引入 RF 网络的独立 Li-Fi 网络作为性能分析的参照系统,记为

NRF. 图 4 给出了不同方法下中断概率与数据率要求之间的关系. 随机生成用户数量上限为 30. 随着数据率要求的增加, 中断概率也随之增加. 同一数据率要求下, NRF、FT、DT 和 MDRC 方法的中断概率值越来越低, 中断概率性能越来越好, 说明提出的 DT 和 MDRC 方法均能够更好的平衡 Li-Fi 和 RF 网络的负载. MDRC 方法在每次将 Li-Fi 网络中数据率最低的用户划分到 RF 网络后, 重新更新 Li-Fi 网络中用户的潜在数据率, 若仍有用户低于数据率要求值, 则继续将用户划分到 RF 网络, 并限制转换到 RF 网络中的用户数量. 因此, MDRC 方法的性能要好于 DT 方法.

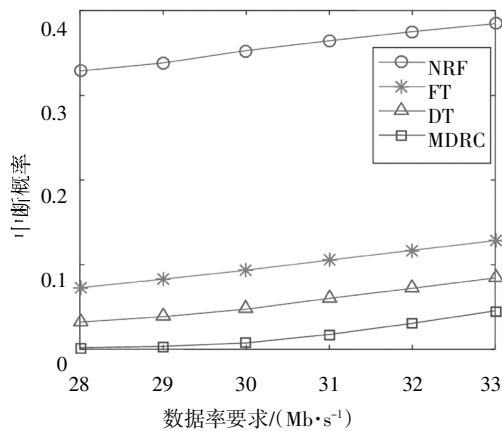


图 4 中断概率与数据率要求之间的关系

Fig.4 Outage probability against data rate requirements

**实验 3 用户数量对中断概率的影响分析.** 图 5 给出了中断概率与随机生成用户数量上限的关系. 数据率要求  $\Lambda$  为 30 Mb/s. 随着随机生成用户数量上限的增加, 用户分得的带宽和时间资源的减少, 使用 4 种方法的系统中中断概率均随之上升. 当随机生成用户数量的上限为 30 时, MDRC 方法的中断概率为 0.69%. 因此, 当用户数量上限小于 30 时, MDRC 方法能足够满足 30 Mb/s 的数据率要求.

**实验 4 用户数据率的累积分布情况分析.** 图 6 给出了用户数据率的累积分布情况. 随机生成用户数量上限为 30, 数据率要求为 30 Mb/s. NRF、FT、DT 和 MDRC 4 种方法的中断概率分别为 34.89%、9.19%、4.53%、0.69%, 即相比 FTAP 分配方法, DT 和 MDRC 两种方法中断概率分别改善 4.66% 和 8.50%. 结果表明, 本文提出的两种 AP 分配方法能够显著提高系统的中断概率性能.

**实验 5 中断数据率估计.** 当系统中工作数据率低于指定数据率的用户数占比总用户数为  $x$  时, 则称该指定数据率为  $x$  中断数据率. 图 7 给出了使用不同 AP 分配方法得到的  $x$  中断数据率. 随机生成

用户数量上限为 30, 数据率要求  $\Lambda$  为 30 Mb/s. 相比于 FT 方法, DT 和 MDRC 方法的 1% 中断数据率分别提高了 3.21 Mb/s 和 9.09 Mb/s, 50% 中断数据率分别提高了 1.62 Mb/s 和 2.64 Mb/s. 可见本文提出的两种方法均在一定程度上提高了低数据率用户的数据率性能.

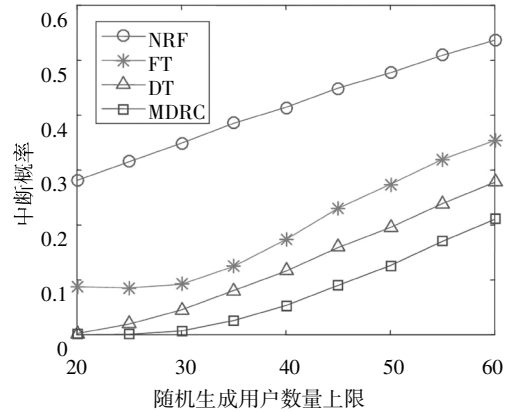


图 5 中断概率与随机生成用户数量上限的关系

Fig.5 Outage probability against maximum randomly generated user numbers

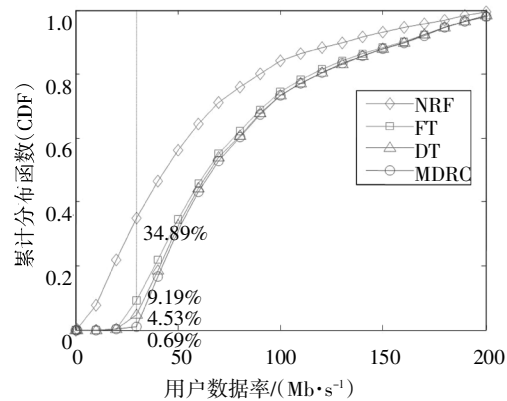


图 6 用户数据率的累积分布函数

Fig.6 Cumulative Distribution Function (CDF) of user data rate

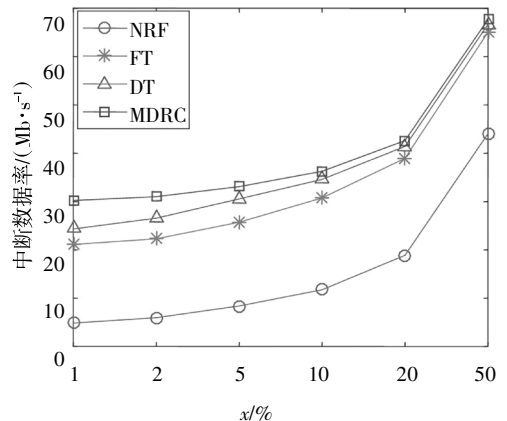


图 7 不同 AP 分配方法下的  $x$  中断数据率

Fig.7 Outage data rate with  $x$  for various methods of AP allocation

## 4 结论

本文设计了一种 Li-Fi 和 RF 混合网络模型,适用于用户位置和用户数量随机改变的动态应用场景,引入了依据转换阈值来决定为用户提供服务 AP 的思想,在考虑交接负载的条件下,提出了动态转换阈值和最小数据率约束等两种改进的 AP 分配方法.仿真实验表明,相比固定阈值的 AP 分配方法,本文提出的两种方法能显著提高混合系统的中断概率性能和用户数据率性能.

## 参考文献

- [1] ELGALA H, MESLEH R, HAAS H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(9):56—62.
- [2] PATHAK P H, FENG X, HU P, *et al.* Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4):2047—2077.
- [3] HAAS H. LiFi: Conceptions, misconceptions and opportunities[C] // Photonics Conference. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2016:680—681.
- [4] HAAS H, CHEN C, O'BRIEN D. A guide to wireless networking by light [J]. Progress in Quantum Electronics, 2017, 55(9):88—111.
- [5] HAAS H, YIN L, WANG Y, *et al.* What is Li-Fi? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6):1533—1544.
- [6] WU X, 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.
- [7] WU X, HAAS H. Access point assignment in hybrid LiFi and WiFi networks in consideration of LiFi channel blockage[C]// IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Sapporo, Japan:IEEE, 2017:1—5.
- [8] 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.
- [9] BASNAYAKA D A, HAAS H. Hybrid RF and VLC systems: Improving user data rate performance of VLC systems[C]// IEEE Vehicular Technology Conference. Glasgow, UK:IEEE, 2015:1—5.
- [10] 吴燕, 张申. 室内 VLC-WiFi 异构无线接入网络研究[J]. 半导体光电, 2017(6):853—856.  
WU Y, ZHANG S. Research on indoor wireless access network of hybrid VLC-WiFi system [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017(6):853—856. (In Chinese)
- [11] WANG Y, BASNAYAKA D A, HAAS H. Dynamic load balancing for hybrid Li-Fi and RF indoor networks [C]// IEEE International Conference on Communication Workshop. London, UK:IEEE, 2015:1422—1427.
- [12] 吴楠, 王旭东, 胡晴晴, 等. 基于多 LED 的高精度室内可见光定位方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(3):727—732.  
WU N, WANG X D, HU Q Q, *et al.* Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(3):727—732. (In Chinese)
- [13] CHEN C, BASNAYAKA D A, HAAS H. Downlink performance of optical attocell networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(1):137—156.
- [14] WANG Y, HAAS H. Dynamic load balancing with handover in hybrid Li-Fi and Wi-Fi networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(22):4671—4682.
- [15] 田婉, 菅春晓, 刘洛琨, 等. 室内 VLC 与 Wi-Fi 混合组网架构设计及吞吐量性能分析 [J]. 计算机应用研究, 2017, 34(6):1850—1853.  
TIAN W, JIAN C X, LIU L K, *et al.* Architecture design and throughput performance analysis of indoor VLC and Wi-Fi hybrid network [J]. Application Research of Computers, 2017, 34(6):1850—1853. (In Chinese)
- [16] STEFAN I, BURCHARDT H, HAAS H. Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks [C]// IEEE International Conference on Communications. Budapest, Hungary: IEEE, 2013:3825—3829.