

## VLC-WiFi异构网络QoS感知的跨层动态资源分配

刘焕淋<sup>\*①</sup> 张彤<sup>①</sup> 陈勇<sup>②</sup> 蒲欣<sup>①</sup> 黄冰川<sup>①</sup> 龚箫楠<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

**摘要:** VLC-WiFi异构网络已经成为广受欢迎的短距离无线通信方式之一。然而,有限的频谱资源导致VLC-WiFi异构网络容量难以满足井喷式增长的用户数据带宽需求。该文结合物理层的动态链路传输性能以及媒体访问控制层的队列缓冲延迟性能,定义链路传输性能和链路服务质量(QoS)感知等级评估公式,根据用户数据包QoS需求,设计QoS感知的跨层动态资源分配(QoS-CLDRA)方法,并引入非正交多址接入的用户匹配与功率分配策略,进一步提升系统的吞吐量。仿真结果表明:所提方法能够有效提升系统吞吐量和降低缓冲队列长度。

**关键词:** VLC-WiFi异构网络; 服务质量; 资源分配; 用户匹配; 系统吞吐量

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)10-3516-08

DOI: 10.11999/JEIT210830

## QoS-aware Cross-layer Dynamic Resource Allocation for Indoor Visible Light Communication-WiFi Heterogeneous Networks

LIU Huanlin<sup>①</sup> ZHANG Tong<sup>①</sup> CHEN Yong<sup>②</sup> PU Xin<sup>①</sup>

HUANG Bingchuan<sup>①</sup> GONG Xiaonan<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** VLC-WiFi (Visible Light Communication-Wireless Fidelity) heterogeneous networks are becoming a popular short-distance wireless communication solution. However, limited spectrum resources make it difficult for VLC-WiFi heterogeneous network to meet the rapidly growth for data bandwidth of user. Combined with the link transmission performance of the physical layer and the queue buffer delay performance of the media access control layer, an evaluation formula of dynamic link transmission performance and link Quality of Service (QoS) perception level are defined. According to the QoS requirements of data packets, the QoS-aware Cross-Layer Dynamic Resource Allocation (QoS-CLDRA) is proposed. Furthermore, the user matching and power allocation strategy based on non-orthogonal multiple access are designed to improve the system throughput. Simulation results show that the proposed QoS-CLDRA can effectively improve the system throughput and reduce the buffer queue length.

**Key words:** Visible Light Communication-Wireless Fidelity (VLC-WiFi) heterogeneous network; Quality of serves (QoS); Resource allocation; User match; System throughput

### 1 引言

移动网络的普及化、生活化使得互联网用户数

量和用户内容生产能力在短时间内急剧上升<sup>[1]</sup>,物联网与工业互联网的迅速发展也使得接入互联网的移动设备数量和应用需求急剧增长,对接入网络的带宽和服务性能需求快速上升<sup>[2]</sup>。由于无线电频谱资源逐渐耗竭,工作频段在2.4 GHz的无线保真(Wireless Fidelity, WiFi)技术的频谱带宽有限,导致其无法从容应对急剧增长的数据流量和带宽需求。而基于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)技术因其拥有可见光波段的广阔频谱资源,且LED

收稿日期: 2021-08-13; 改回日期: 2022-01-05; 网络出版: 2022-02-03

\*通信作者: 刘焕淋 liuhl2@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(51977021), 重庆市自然科学基金(2019jcyj-msxmX0613, 2020jcyj-msxmX0682)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (51977021), The Natural Science Foundation of Chongqing (2019 jcyj-msxmX0613, 2020jcyj-msxmX0682)

布设方便、绿色节能、安全可靠,有望成为下一代无线通信最具潜力的通信技术<sup>[3,4]</sup>。VLC与WiFi技术互补形成的VLC-WiFi异构网络能够为室内用户提供更加高速、绿色和可靠的通信服务<sup>[5]</sup>。

近年来,游戏直播、在线教育等多媒体业务发展迅速,流媒体直播服务的低延时、高速率的用户体验质量(Quality of Experience, QoE)的需求为VLC-WiFi网络接入和资源分配策略带来了新的挑战<sup>[5,6]</sup>。文献<sup>[5]</sup>提出一种基于静态频谱分配的用户中心接入(User-Centric Access based on Regular Spectrum Allocation, UCARSA)方法以进一步提升VLC-WiFi系统吞吐量及用户体验性能。文献<sup>[7]</sup>提出一种基于用户QoE最大化VLC-WiFi异构网络最小成本的垂直切换方案。文献<sup>[8]</sup>提出VLC-RF(Visible Light Communication-Radio Frequency)混合网络的联合优化功率分配与负载均衡方法,该方法在均衡网络负载的同时,基于用户速率体验优先思想优先切换QoE较低的用户至其他AP(Access Point),以提升用户速率及系统吞吐量。文献<sup>[9]</sup>将光小区划分为中心区域和边缘区域,通过研究单LED系统的中心用户速率与边缘用户速率差别,优化LED的半功率角以提升单位面积接入用户的可达速率,并保证系统中用户的速率体验效果。

由于用户QoE缺乏有效的量化方式,多数文献通过评估网络的服务质量(Quality of Serves, QoS)指标反映用户体验的性能,即网络QoS指标高时默认用户QoE较好。文献<sup>[10]</sup>研究了统计排队约束下混合VLC-RF系统的链路选择策略,以发射器缓冲区的最大数据到达速率与非渐进缓冲延迟边界为主要性能指标,设计链路选择策略以保证网络的数据传输满足QoS要求。文献<sup>[11]</sup>将有效带宽和有效容量理论引入室内VLC网络用以解决多用户调度问题,保证用户的统计时延QoS性能。文献<sup>[12]</sup>通过建立3维动态用户优先级测量模型,基于业务流量、用户位置、链路状况信息,借助模糊逻辑方法评估用户优先级,进而提出基于优先级约束的吞吐量最大化资源分配方案。

文献<sup>[13]</sup>从媒体访问控制(Media Access Control, MAC)协议设计的角度解决混合VLC-WiFi网络的资源分配问题,该文建议在当前MAC(Media Access Control)协议的基础上新添加一个子层,该子层通过信道感知和流量感知做出动态信道选择的智能控制决策。进而,文献<sup>[14]</sup>提出VLC网络动态资源管理的跨层设计,考虑用户数据包随机到达的情况,MAC层提供数据包所在的队列状态信息,物理层提供用户的信道状态信息,由中心控制器在队列稳

定性与功率约束的条件优化网络资源的分配。跨层资源分配对于网络的长期稳定运行和长期网络性能的提升至关重要,文献<sup>[10-14]</sup>均从物理层与MAC层的跨层角度设计VLC异构网络的资源分配策略,上述研究表明:跨层资源分配策略能够有效地保证用户QoS需求和优化网络长期性能。

因此,为了满足室内VLC-WiFi异构网络支持多媒体业务的QoS需求,基于用户感知的系统跨层QoS评估模型<sup>[15]</sup>,本文设计一种QoS感知的跨层动态资源分配(QoS-aware Cross-Layer Dynamic Resource Allocation, QoS-CLDRA)方法,通过在应用层和数据传输层之间的信息交互, QoS-CLDRA方法可以感知传输链路的QoS,并依据QoS感知级别调整系统的资源分配,以改善系统性能;当系统需要调整用户传输链路及带宽时,本文引入非正交多址接入(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)用户匹配与功率分配策略,进一步提升系统的容量。

## 2 VLC-WiFi网络和跨层资源分配模型

室内VLC-WiFi异构网络模型如图1所示,16个VLC AP的LED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(Photoelectric Detector, PD)用于接收用户信息。VLC AP与WiFi AP通过电力线接入VLC-WiFi异构网络的控制器<sup>[16]</sup>,通过控制器连接室外的光网络或基站。

用户数据包经过光互联网或者3G/4G/5G无线网络的传输,到达室内VLC-WiFi异构网络的控制器,控制器根据用户数据包请求信息进行VLC-WiFi网络的跨层资源分配,如图2所示,这里,控制器由缓冲区、QoS需求级别判定模块、QoS感知级别评估模块、跨层资源分配模块等构成。在图2中,到达控制器的用户数据包一方面被存储在达缓冲区中,另一方面,其包头部分的MAC信息被QoS需求级别判定模块读取和识别,并由用户签约信息确定数据包的QoS需求级别。对于与新到达数据包目

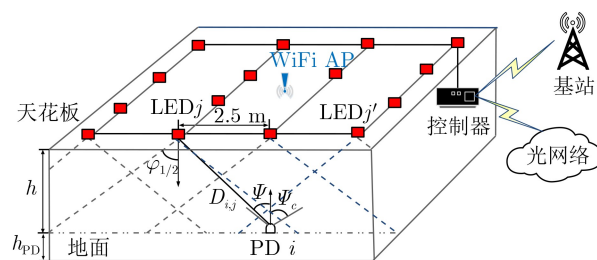


图1 室内VLC-WiFi异构网络模型

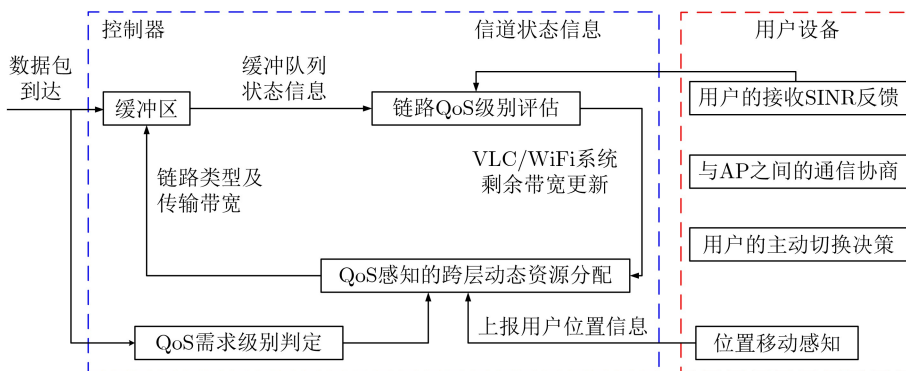


图2 VLC-WiFi网络的跨层资源分配框图

的MAC地址相同的数据缓冲队列，由QoS感知级别评估模块结合物理层信道状态信息与MAC层队列状态信息评估该缓冲队列数据的QoS感知级别。控制器则需要为每个缓冲队列选择传输链路类型以及分配信道传输带宽。数据包进入控制器的缓冲队列之后，排队等待AP发送给接收用户。

在图2中，跨层资源分配模块依据用户数据包的QoS需求级别与缓冲区队列的链路QoS评估级别，结合系统感知的用户位置信息，为数据包选择传输链路类型和传输带宽及服务AP的信息，并标志在缓冲区的数据包上。用户设备需要将用户位置信息与接收到的信干噪比(Signal Interference Noise Ratio, SINR)等信息反馈给控制器，以便控制器调整系统的资源分配方案。用户在接收来自VLC AP或WiFi AP的数据包之前，需要与AP进行传输协议的协商，用户也有可能主动要求切换AP，这两项内容不在本文的研究范围以内。在单位调度周期内，当缓冲区中的数据通过所标志的AP、传输链路和带宽到达用户端时，更新缓冲区队列的未发送数据包状态信息，并更新VLC与WiFi系统的剩余带宽资源值。

在图2中，缓冲区存储着VLC-WiFi系统所有待发送给用户的数据包，缓冲区的一个缓冲队列对应一个AP到接收端的连接请求，设队列中待发送数据数目为 $n$ ，当数据包标志了资源分配的传输链路、传输带宽和服务AP信息时，数据包在服务周期内就可以通过AP发送给接收用户。缓冲队列中的数据遵循先到先服务原则，若单位调度周期内缓冲队列的数据包到达数目为 $\lambda$ ，单位调度周期内缓冲队列的数据包离开数目为 $\mu$ ， $\mu$ 值与链路的传输速率相关，其计算方法为<sup>[17]</sup>

$$\mu = R \cdot T / S \quad (1)$$

其中， $R$ 为当前调度周期内下行传输链路的传输速率， $T$ 为调度周期，单位s； $S$ 为数据包大小，单位bit。

在 $t+1$ 时刻，缓冲队列 $n$ 的队列长度可以表示为<sup>[14]</sup>

$$Q_n(t+1) \leq \max[Q_n(t) - \mu_n(t), 0] + \lambda_n(t) \quad (2)$$

其中， $Q_n(t)$ 表示 $t$ 时刻缓冲队列 $Q_n$ 的队列长度； $\mu_n(t)$ 表示 $t$ 时刻缓冲队列 $Q_n$ 的数据包离开数目； $\lambda_n(t)$ 表示 $t$ 时刻缓冲队列 $Q_n$ 的数据包到达数目。

### 3 QoS感知的跨层动态资源分配

#### 3.1 QoS感知级别评估

系统的QoS感知级别评估由数据包在缓冲区的延迟性能与链路传输性能共同决定，其中，链路传输性能可由链路的数据传输速率评价，文献[18]给出了无线通信链路在给定时刻 $t$ 的通用链路传输性能评价为

$$U(P(t)) = \left( \frac{P(t)}{P_M} \right)^\zeta \times \left[ 1 + \left( \frac{P(t)}{P_M} \right)^\zeta \right]^{-1} \quad (3)$$

其中， $P(t)$ 为 $t$ 时刻的链路性能指标， $P_M$ 为该性能指标的最低要求值，整形参数 $\zeta = 5$ <sup>[18]</sup>。

评价VLC-WiFi链路传输性能可参考链路的传输带宽和传输SINR指标，当链路带宽与SINR指标同时高时，认为该链路通信速率较高，使用通信速率衡量指标 $U(R(t))$ 评价链路传输速率的性能好坏<sup>[18]</sup>。

$$U(R(t)) = U(B(t)) \cdot \lg(1 + U(P(t))) \quad (4)$$

其中， $U(B(t))$ 代表链路的传输带宽性能， $U(P(t))$ 代表链路的SINR性能，由式(3)计算，它与信号传输功率密和信道质量相关。

则系统的QoS感知级别评估为

$$\text{QoS}(t) = \omega \cdot U(D(t)) + (1 - \omega) \cdot U(R(t)) \quad (5)$$

其中， $\omega$ 为缓冲队列的延迟性能在QoS级别评估中所占的比重，称为缓冲延迟权重， $0 \leq \omega \leq 1$ ； $D(t)$ 表示缓冲队列中的数据包的缓存时延，单位为s，时延阈值用 $D_{th}$ 表示

$$D(t) = Q(t) \cdot S / R(t) \quad (6)$$

其中， $Q(t)$ 表示当前缓冲队列的长度，即当前缓存

队列中数据包的数目,  $S$ 为数据包大小,  $R(t)$ 表示当前缓冲队列对应链路的数据传输速率。

由于室内VLC-WiFi异构网络拥有VLC与WiFi两种不同类型的传输链路, 当使用WiFi传输链路时, 则评估QoS感知级别的WiFi SINR经过式(7)等效为VLC SINR

$$U_{W \rightarrow V}(P(t)) = \Gamma_V \times \left[ \left( 1 + \frac{U(P(t))}{\Gamma_W} \right)^{\frac{B^W}{B^V}} - 1 \right] \quad (7)$$

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,  $U(P(t))$ 代表WiFi链路传输SINR, 由式(3)计算,  $B^V$ 代表VLC子信道带宽,  $B^W$ 代表WiFi子信道带宽。

### 3.2 QoS需求级别判定

图2所示的QoS需求级别判定模块在读取新到达数据包包头的目的MAC地址之后, 查询该数据包的目的MAC地址所属用户的签约信息, 根据5G系统中用户的签约信息包含3GPP TS 23.501 version 16.6.0 Release 16协议规定的5G QoS标识(5G QoS Identify, 5QI), 当用户签约信息的5QI  $\leq 30$ 时, 判定该用户数据包的QoS需求级别为高; 当用户签约信息的 $60 \geq 5QI > 30$ 时, 判定该用户数据包的QoS需求级别为中; 当用户签约信息的 $90 \geq 5QI > 60$ 时, 判定该用户数据包的QoS需求级别为低。室内VLC-WiFi异构网络的数据包经过QoS标识识别后, 数据包被标记为高、中、低3种QoS需求级别, 并依据QoS需求级别为数据包分配合适的下行传输链路类型、传输带宽、传输功率等通信资源。

### 3.3 QoS-CLDRA方法步骤

根据室内VLC-WiFi异构网络识别的数据包的QoS需求级别, 结合系统服务的QoS感知级别评

估, 本文设计QoS感知的跨层动态资源分配(QoS-CLDRA)方法, QoS-CLDRA方法的具体步骤如表1。

### 3.4 NOMA用户匹配与功率分配策略

由于VLC和WiFi系统的通信带宽是有限的, 当室内VLC-WiFi异构网络的用户数据包的到达速率大于网络的服务速率时, 系统的带宽资源难以满足用户需求, 用户数据包大量堆积在缓冲区将导致网络拥塞和排队时延增加, 进而影响用户体验的QoS性能。针对上述问题, 本文引入采用串行干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术的NOMA用户匹配与功率分配策略, 提高带宽资源的利用率和系统的服务性能, 具体思想为: 当VLC或WiFi系统剩余带宽资源不能满足数据包需求的带宽时, 判断用户数据包所在的缓冲队列能否与相同系统的其他用户的数据包缓冲队列进行NOMA匹配, 使同一系统的不同用户的缓冲队列以不同的传输功率共享相同的传输带宽。

VLC系统和WiFi系统寻找NOMA配对的缓冲队列的方法相同, 但是, 不同系统的信道增益计算公式不一样。下面以VLC系统的不同用户的数据缓冲队列的NOMA匹配为例, 介绍NOMA用户匹配和功率分配过程。在VLC系统中, 根据朗伯辐射模型, 计算VLC用户 $k$ 与距离最近的VLC AP之间的信道增益为 $h_k$ , 并根据信道增益值升序排列 $K$ 个用户的数据缓存队列, 即 $h_1 < h_2 < \dots < h_k < \dots < h_K$ 。将 $K$ 个用户缓存队列划分为弱用户集合 $H_1 = \{h_1, h_2, \dots, h_a\}$ 、普通用户集合 $H_2 = \{h_{a+1}, h_{a+2}, \dots, h_b\}$ 和强用户集合 $H_3 = \{h_{b+1}, h_{b+2}, \dots, h_K\}$ , 其中,  $|H_1| = \lfloor K/3 \rfloor$ ,  $|H_3| = \lfloor K/3 \rfloor$ ,  $|H_2| = K - 2 \cdot \lfloor K/3 \rfloor$ 。NOMA用户匹配遵循信道增益强用户与弱用户匹配原则, 以降低接收端连续干扰消除的复杂度和解码的误码率。

表1 QoS-CLDRA算法

输入: 数据包请求, 系统的缓冲区队列延迟阈值、SINR的功率阈值、传输带宽阈值, AP的发射功率 $P_i$ ;
输出: 数据包选择的传输信道类型和系统分配的带宽, 发射功率, 缓冲区各缓冲队列长度及系统剩余带宽值。
(1) 根据数据包的包头MAC地址, 查询用户签约的5G QoS表示, 判断数据包的QoS需求级别, 并从数据包的包头MAC地址判断目的用户的位置信息, 确定该数据包缓存在能服务用户的VLC AP或WiFi AP对应的缓冲队列中;
(2) 由式(5)评估该用户数据包缓冲队列的下行传输链路的QoS感知级别;
(3) 判断用户数据包的QoS需求级别是否为低, 若是, 转步骤(5), 否则, 转步骤(4);
(4) 判断用户数据包的QoS需求级别是否低于该用户数据包缓冲队列的下行传输链路的QoS感知级别, 若是, 即QoS需求级别为高且系统QoS感知级别为中, 或者QoS需求级别为中且系统QoS感知级别为低, 将前数据包缓存在该用户待发送数据包缓冲队列中, 排队等待该AP发送, 包发送功率为 $P_i$ , 转步骤(8); 否则, 转步骤(5);
(5) 判断该用户数据包的缓冲队列的下行传输链路是否为WiFi链路, 若是, 转步骤(6); 否则, 转步骤(7);
(6) 判断WiFi系统剩余带宽是否大于1 MHz, 若是, 为该用户数据包从缓冲区中开辟新的缓冲队列, 并分配传输带宽为1 MHz的WiFi链路, 转步骤(8); 否则, 执行NOMA用户匹配与功率分配策略, 转步骤(8);
(7) 判断VLC系统剩余带宽是否大于4 MHz, 若是, 为该用户数据包从缓冲区中开辟新的缓冲队列, 并分配传输带宽为4 MHz的VLC链路, 转步骤(8); 否则, 执行NOMA用户匹配与功率分配策略, 转步骤(8);
(8) 等待当前周期结束, 输出数据包选择的传输信道类型和系统分配的带宽, 数据包AP发送功率, 各缓冲队列长度及系统剩余带宽值。

采用参考文献[19]所提的功率分配策略为匹配成功的NOMA用户数据包分配功率,即NOMA用户组中待匹配用户 $k$ 的功率分配系数 $\alpha_k$ 为

$$\alpha_k = \begin{cases} \frac{h_k}{h_K} \times \left[ 1 + \left( \frac{h_k}{h_K} \right) \right]^{-1}, & h_k \in H_1 \text{ 或 } H_2, \text{NOMA 匹配 } H_3 \\ \left[ 1 + \left( \frac{h_1}{h_k} \right) \right]^{-1}, & h_k \in H_2 \text{ 或 } H_3, \text{NOMA 匹配 } H_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $K$ 表示缓冲区中用户数目,表示NOMA用户组中的用户数目, $H_1$ 、 $H_2$ 和 $H_3$ 分别表示缓冲区中的弱、普通和强信道增益用户集合, $h_1 < h_2 < \dots < h_K$ 。

当数据包感知到系统提供的QoS级别低于数据包需求的QoS级别时,控制器启动NOMA用户匹配与功率分配策略流程,该策略的具体步骤如表2。

## 4 仿真性能与分析

### 4.1 仿真环境及评价指标

室内VLC-WiFi异构网络的相关仿真参数如表3所示,布局有16个VLC AP和1个WiFi AP,室内VLC-WiFi异构网络的每个用户数据包大小为1000 bit,每个缓冲队列的数据包到达过程服从指数为 $\lambda$ 的泊松分布。用户数据包的QoS需求有高、中、低3个级别。用于评估QoS感知级别的下行传输链路带宽阈值为2 MHz,数据包缓冲队列延迟阈值为2 s,用户接收SINR的功率阈值为10 dB。

VLC链路子信道带宽为4 MHz,WiFi链路子信道带宽为1 MHz。系统的资源调度周期为1 s,总共设置600个调度周期。在QoS-CLDRA中,设置上行传输链路QoS感知的各路信息的报告周期为30 ms。

本文所提QoS-CLDRA方法和对比算法在Visual studio2013平台上验证的性能指标为:系统吞吐量与缓冲队列长度。系统吞吐量为每分钟经由VLC和WiFi链路传输的数据包总量,缓冲队列长度代表着数据包在缓冲区的排队时延,也代表着VLC-WiFi异构网络的资源调度水平和下行链路传输能力。缓冲队列长度越短表示数据包的缓冲时延越小,QoS-CLDRA方法的性能越好。

本文首次提出VLC-WiFi异构网络QoS感知的跨层动态资源分配方法,尚未发现相关文献对此方向进行研究,因此不设置其他对比算法。同时,为了本文验证NOMA用户匹配与功率分配策略对于

表2 NOMA用户匹配与功率分配策略

输入:	带宽分配失败数据包及其标记的系统传输链路和缓冲队列,缓冲区所有数据包的信道增益值,AP的发射功率 $P_t$ ;
输出:	数据包的缓存队列NOMA匹配信息、NOMA匹配的系统带宽和传输链路,NOMA匹配的功率分配值。
(1)	判断用户数据包标记的缓冲队列的下行传输链路是否为VLC链路,若是,将缓冲区内所有使用VLC下行传输链路的数据包缓冲队列的所属用户保存在VLC NOMA匹配候选用户集合中;否则,将缓冲区内所有使用WiFi下行传输链路的数据包缓冲队列的所属用户保存在WiFi NOMA匹配候选用户集合中;
(2)	将数据包所属系统的NOMA集合中的用户按照信道增益值升序排列用户数据包,设集合中总用户数目为 $K$ ,将这 $K$ 个用户划分为弱用户集合 $H_1 = \{h_1, h_2, \dots, h_a\}$ 、普通用户集合 $H_2 = \{h_{a+1}, h_{a+2}, \dots, h_b\}$ 和强用户集合 $H_3 = \{h_{b+1}, \dots, h_K\}$ ,其中, $ H_1  = \lfloor K/3 \rfloor$ , $ H_3  = \lfloor K/3 \rfloor$ , $ H_2  = K - 2 \cdot \lfloor K/3 \rfloor$ ;
(3)	若用户数据包在集合 $H_2$ 中,则将当前用户数据包队列与集合 $H_1$ 中信道增益值最小的用户,或集合 $H_3$ 中信道增益值最大的用户构成NOMA用户组,转步骤(5);否则,转步骤(4);
(4)	若用户数据包在集合 $H_1$ 中,则将当前用户数据包队列与集合 $H_3$ 中信道增益值最大的用户构成NOMA用户组,转步骤(5);否则,将当前用户数据包队列与集合 $H_1$ 中信道增益值最小的用户匹配成NOMA用户组,转步骤(5);
(5)	由式(8)计算NOMA用户组中待分配用户的功率分配系数 $\alpha_k$ ,则该用户分配功率为 $\alpha_k \times P_t$ ,而配对的另一个用户的功率为 $(1 - \alpha_k) \times P_t$ ,将待分配用户的带宽设置为NOMA用户组中已分配用户的传输链路带宽,共享NOMA用户组的下行传输链路和带宽;
(6)	数据包的缓存队列NOMA匹配信息、NOMA匹配的系统带宽和传输链路,NOMA匹配的用户数据包的包发送功率值 $\alpha_k \times P_t$ 和 $(1 - \alpha_k) \times P_t$ 。

表3 默认仿真参数

参数	含义	数值	参数	含义	数值
$L \times W \times H$	房间大小	$10 \times 10 \times 3 \text{ m}^3$	$T(\psi)$	光滤波增益	1
$h_{PD}$	PD的高度	1.2 m	$A_{PD}$	PD的接收面积	$1 \text{ cm}^2$
$P^V$	VLC AP的发射功率	10 W	$\gamma$	光电转换系数	0.53 A/W
$B^V$	VLC系统带宽	40 MHz	$P^W$	WiFi AP的发射功率	20 dBm
$\phi_{1/2}$	发射机的半功率角	$60^\circ$	$B^W$	WiFi系统带宽	22 MHz

系统性能的提升有帮助，将采用NOMA用户匹配与功率分配策略的QoS-CLDRA方法(QoS-CLDRA使用NOMA)和不采用NOMA用户匹配与功率分配策略的QoS-CLDRA方法(QoS-CLDRA未使用NOMA)进行对比分析。

### 4.2 仿真结果及分析

图3展示了当用户数目 $K=20$ 时，VLC-WiFi异构网络的系统吞吐量随缓冲延迟权重的变化情况，分别对比QoS-CLDRA使用NOMA与QoS-CLDRA未使用NOMA的系统吞吐量性能。当 $\omega = 0$ 时，由式(5)知，系统的QoS感知级别评估仅受到链路传输速率的影响，缓冲队列的时延对服务性能没有影响，因此，为新到达数据包选择传输链路时只考虑链路传输带宽与接收SINR，为数据包队列选择大于或等于数据包需求QoS级别的系统QoS级别对应的链路，忽略数据包在获得该链路服务之前在缓冲区排队等待的时延。当 $\omega$ 增大时，系统的QoS级别评估需要考虑系统当前链路的传输能力以及该数据包在缓冲区的排队等待时延，同样的链路传输速率条件下，数据包会选择排队时间短的空闲链路，而不执著于选择排队时间长的繁忙高传输速率链路，因此，系统单位时间内传输数据包总量增加。当 $\omega$ 进一步增大至0.6及以上时，系统的QoS感知级别评估对于队列的缓冲延迟比较倚重，新到达数据包侧重缓冲延迟小的链路，链路传输速率和能力的因素减小，使宽带链路的传输能力没有得到充分利用，因此，系统传输的数据包总量开始下降。

在图3中，当 $\lambda = 20$ 包/s， $K=20$ 时，采用NOMA匹配和功率分配策略比没有NOMA策略的QoS-CLDRA的系统吞吐量高，这是因为当缓冲区排队的数据包较多、VLC与WiFi链路均长时间处于工作繁忙状态、系统带宽紧缺之时，引入NOMA用户匹配与功率分配策略可以为缓冲区的用户数据包缓冲队列选择QoS需求级别相同的其他用户数据包缓冲队列，形成NOMA用户组，组内的用户数

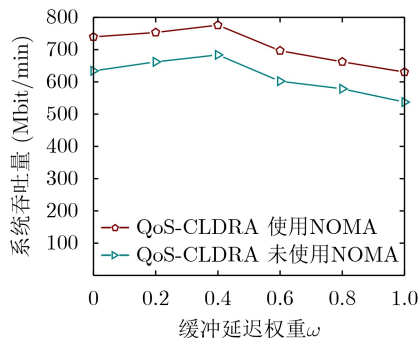


图3 系统吞吐量受 $\omega$ 变化的影响

据包队列被分配不同的发射功率，且共享组内所有用户的传输带宽。因此，QoS-CLDRA使用NOMA的系统吞吐量相较于QoS-CLDRA未使用NOMA更高。

图4和图5分别展示了当 $\lambda = 20$ 包/s， $K=20$ 时，VLC-WiFi异构网络的VLC和WiFi缓冲队列长度随缓冲延迟权重 $\omega$ 的变化情况，其中，图4展示VLC系统的链路缓冲队列长度随 $\omega$ 变化性能，图5展示WiFi系统的链路缓冲队列长度随 $\omega$ 变化性能。当权重系数 $\omega = 0$ 时，系统的链路QoS感知级别评估仅受到链路传输速率的影响，新到达数据包仅考虑传输速率高的链路，不考虑数据包在缓冲区的排队等待时延，致使数据包宁可选择传输速率高但排队延迟大的链路，而不选择排队延迟小的链路，大量数据包在缓冲区排队等待调度，而部分低传输速率的链路却处于空闲状态，造成系统资源的浪费。当 $\omega$ 增大时，系统的链路QoS感知级别评估将综合考虑系统当前链路的传输能力以及该数据包在缓冲区的排队等待时延，低传输速率的链路也得到了充分利用，这促使链路的传输速率增加，减少了数据包总排队等待时延，平均缓冲队列长度迅速降低。当 $\omega$ 进一步增大至0.8时，链路QoS感知级别评估对于缓冲延迟过于倚重，新到达数据包过于依赖缓冲排队延迟更小的链路，致使缓冲延迟大但传输速率高的链路资源利用率出现折损，缓冲延迟小且传输速

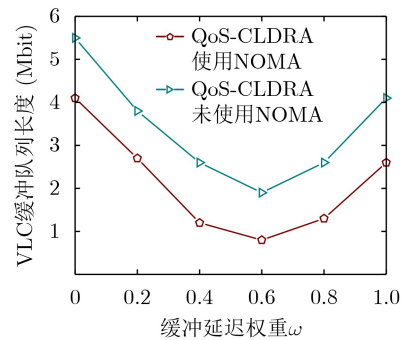


图4 VLC缓冲队列长度与 $\omega$ 关系

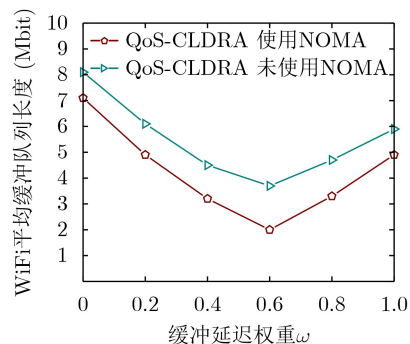


图5 WiFi缓冲队列长度与 $\omega$ 关系

率低的链路更易得到利用,使系统的链路传输总速率降低,因此滞留在缓冲区的排队数据包数量增多。

引入NOMA用户匹配与功率分配策略使得系统资源的利用率得到极大提升,带宽资源复用带来传输能力的极大提升,使得缓冲数据包的排队等待时延大幅降低,即QoS-CLDRA使用NOMA的缓冲队列长度相较于QoS-CLDRA未使用NOMA有明显改善。对比图4和图5的纵坐标轴发现,VLC链路的缓冲队列长度明显低于WiFi链路的缓冲队列长度,且NOMA技术对于VLC网络的性能提升比WiFi网络性能提升的幅度大。这是因为VLC链路的传输损耗较小,参与VLC链路QoS感知级别评估的用户信道状态信息更加准确,使VLC链路能够及时调整系统的资源分配并适时地启用NOMA用户匹配与功率分配策略,有效疏导缓冲区内的VLC数据包队列。由于WiFi系统的QoS感知级别一直偏低,即使启用NOMA用户匹配与功率分配策略或者为新到达的数据包开辟新队列,该用户数据包缓冲队列能够使用的传输带宽有限,存在于缓冲队列的大量数据包不易得到快速疏导和传输。

图6展示了VLC-WiFi异构网络的系统吞吐量随着用户数目变化的情况。随着用户数目的逐渐增多,系统吞吐量逐渐上升,然而上升速率逐渐变缓。当数据包的到达率不变时,用户数目的增多意味着缓冲队列数目的增多,即下行传输链路数目增加,因此,系统吞吐量迅速增加;当用户数目少于18时,缓冲区的用户数据包队列偏少,系统剩余带宽充足,系统吞吐量较小。随着用户数目增加,下行传输链路带宽持续增加,系统吞吐量也迅速增加,当用户数目增加至18以上的时候,系统剩余带宽紧缺,下行链路传输的总带宽不再无条件扩大,吞吐量的增加速度减缓。QoS-CLDRA使用NOMA对VLC-WiFi系统资源实现了带宽复用,提高了资源利用率,其系统吞吐量相较于QoS-CLDRA未使用NOMA更高,当用户数目为24时,QoS-CLDRA使用NOMA的系统吞吐量比QoS-CLDRA未使用NOMA系统吞吐量高约13.47%。

图7展示了VLC-WiFi异构网络的系统吞吐量随着数据包到达率变化的情况。随着数据包到达率逐渐增加,系统吞吐量先迅速上升,后逐渐趋于平缓。VLC-WiFi异构网络的带宽资源有限,致使下行链路传输的总速率受限,当数据包到达率上升至每秒24个之后,下行链路的总传输速率不及数据包的到达速率,大量数据包积压在缓冲区内部排队等待,因此系统吞吐量无法继续大幅度上升。QoS-CLDRA使用NOMA的系统吞吐量始终随着数据包到达率的增加而快速上升,尽管数据包到达率增加

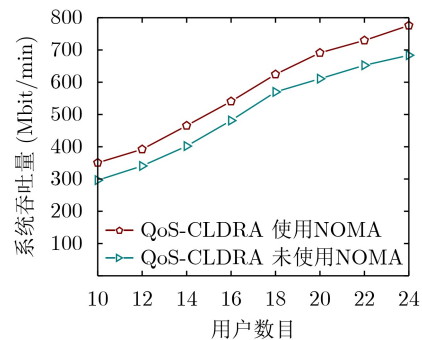


图6 系统吞吐量受用户数目的影响,  $\lambda = 20, \omega = 0.6$

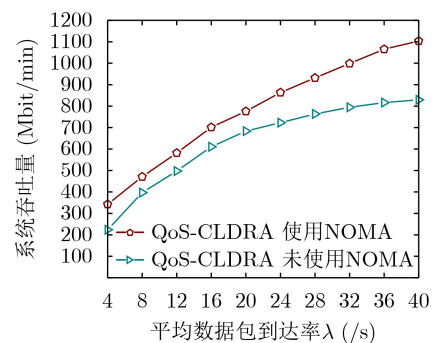


图7 系统吞吐量受 $\lambda$ 变化的影响, 用户数目=20,  $\omega = 0.6$

至每秒40个时,系统的传输带宽受到限制,但NOMA技术的引入使得异构网络对于带宽的利用率增大,系统吞吐量不再受到系统带宽的限制,网络容量可以得到大幅度扩展。当数据包到达速率为40个/秒时,QoS-CLDRA使用NOMA的系统吞吐量比QoS-CLDRA未使用NOMA系统吞吐量高约33.05%。

## 5 结束语

本文主要针对业务类型多样化以及用户需求差异化现象导致系统资源调度的灵活性不高、系统资源利用率低的问题,提出室内VLC-WiFi异构网络QoS感知的跨层动态资源分配(QoS-CLDRA)方法,当系统带宽资源不足时,引入NOMA用户匹配与功率分配策略进一步提升网络容量和带宽资源的利用率。随着万物互联网的发展,接入网面临大量数据接入和QoS需求差异要求,网络的QoS差异服务和有限带宽资源利用率将制约互联网应用发展,有效的资源调度算法是促进应用发展和提高网络服务性能的有效手段。

## 参考文献

- [1] 付亚伟. 大数据互联网时代光纤通信技术的发展与挑战[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2021, 33(1): 52-58. doi: 10.3979/j.issn.1673-825X.201905080181.  
FU Yawei. Development and challenge of optical fiber communication technology in the era of big data internet[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and*

- Telecommunications:Natural Science Edition*, 2021, 33(1): 52–58. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.201905080181](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.201905080181).
- [2] MARSHOUD H, MUHAIDAT S, SOFOTASIOS P C, *et al.* Optical Non-orthogonal multiple access for visible light communication[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(2): 82–88. doi: [10.1109/MWC.2018.1700122](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700122).
- [3] 雷新颖, 王成. 一种多孔径接收器的设计及其可见光通信系统[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2021, 33(1): 59–66. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057).  
LEI Xinying and WANG Cheng. Design of a multiple bore diameter receiver and its visible communication system[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications:Natural Science Edition*, 2021, 33(1): 59–66. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.201902150057).
- [4] WU Xiping, CHEN Cheng, and HAAS H. Mobility management for hybrid LiFi and WiFi networks in the presence of light-path blockage[C]. The IEEE 88th Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 2019: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690694](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690694).
- [5] LIU Huanlin, PU Xin, CHEN Yong, *et al.* User-centric access scheme based on interference management for indoor VLC-WIFI heterogeneous networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(4): 7903712. doi: [10.1109/JPHOT.2020.3002246](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2020.3002246).
- [6] 谢显中, 高龙龙, 卢华兵. VLC网络中兼顾QoS和公平性的协作子载波与功率分配算法[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版, 2021, 33(1): 7–17. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122).  
XIE Xianzhong, GAO Longlong, and LU Huabing. Coordinated subcarrier and power allocation algorithms considering both QoS and fairness for VLC networks[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications:Natural Science Edition*, 2021, 33(1): 7–17. doi: [10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122](https://doi.org/10.3979/j.issn.1673-825X.201904090122).
- [7] BAO Xu, ADJARDJAH W, OKINE A A, *et al.* A QoE-maximization-based vertical handover scheme for VLC heterogeneous networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 2018(1): 269. doi: [10.1186/s13638-018-1284-1](https://doi.org/10.1186/s13638-018-1284-1).
- [8] OBEED M, SALHAB A M, ZUMMO S A, *et al.* Joint optimization of power allocation and load balancing for hybrid VLC/RF networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(5): 553–562. doi: [10.1364/JOCN.10.000553](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000553).
- [9] XU Jiaojiao, GONG Chen, LUO Jianghua, *et al.* LED half-power angle optimization for ultra-dense indoor visible light communication network deployment[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 835–848. doi: [10.1109/OJCOMS.2020.3005421](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3005421).
- [10] 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. doi: [10.1109/TWC.2018.2802937](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2802937).
- [11] DONG Xiaoli, CHI Xuefen, SUN Hongliang, *et al.* Scheduling with heterogeneous QoS provisioning for indoor visible-light communication[J]. *Current Optics and Photonics*, 2018, 2(1): 39–46. doi: [10.3807/COPP.2018.2.1](https://doi.org/10.3807/COPP.2018.2.1).  
039.
- [12] BAI Xiangwei, LI Qing, and TAO Siyu. Resource allocation based on dynamic user priority for indoor visible light communication ultra-dense networks[C]. The 18th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT), Chongqing, China, 2018: 331–337. doi: [10.1109/ICCT.2018.8599884](https://doi.org/10.1109/ICCT.2018.8599884).
- [13] WANG Xuehui and CHEN Wei. Design and optimization of a full duplex CSMA/CA medium access mechanism for hybrid visible light communication networks[C]. The 9th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, 2020: 347–351. doi: [10.1109/ITAIC49862.2020.9339115](https://doi.org/10.1109/ITAIC49862.2020.9339115).
- [14] DEMIR M S and UYSAL M. A cross-layer design for dynamic resource management of VLC networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(3): 1858–1867. doi: [10.1109/TCOMM.2021.3056119](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3056119).
- [15] ZHU Shansheng, DONG Yuning, and XU Cheng. A statistical QoE-QoS model of video streaming services[C]. The 6th International Conference on Computing and Data Engineering, Sanya, China, 2020: 195–199. doi: [10.1145/3379247.3379252](https://doi.org/10.1145/3379247.3379252).
- [16] 李祝红, 赵灿明, 闫龙, 等. 智能电网中电力线通信网络负载均衡的机会路由协议[J]. 计算机应用, 2019, 39(3): 812–816. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018071457](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018071457).  
LI Zhuhong, ZHAO Canming, YAN Long, *et al.* Load balancing opportunistic routing protocol for power line communication network in smart grids[J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(3): 812–816. doi: [10.11772/j.issn.1001-9081.2018071457](https://doi.org/10.11772/j.issn.1001-9081.2018071457).
- [17] ZHANG Han, LIU H X, CHEN Peng, *et al.* Cycle-based end of queue estimation at signalized intersections using low-penetration-rate vehicle trajectories[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(8): 3257–3272. doi: [10.1109/TITS.2019.2925111](https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2925111).
- [18] BOUALI F, SALLENTO O, PÉREZ-ROMERO J, *et al.* A framework based on a fitness factor to enable efficient exploitation of spectrum opportunities in cognitive radio networks[C]. The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Brest, France, 2011: 1–5.
- [19] TAO Siyu, YU Hongyi, LI Qing, *et al.* Performance analysis of gain ratio power allocation strategies for non-orthogonal multiple access in indoor visible light communication networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2018, 2018(1): 154. doi: [10.1186/s13638-018-1152-z](https://doi.org/10.1186/s13638-018-1152-z).

刘焕淋: 女, 教授, 研究方向为光通信技术与网络。

张彤: 女, 硕士生, 研究方向为可见光网络。

陈勇: 男, 教授, 研究方向为光通信与传感检测。

蒲欣: 女, 硕士生, 研究方向为可见光网络。

黄冰川: 男, 硕士生, 研究方向为可见光网络。

龚萧楠: 女, 硕士生, 研究方向为可见光网络。