

本文引用格式:刘焕淋,周会凌,陈勇,等. VLC-WiFi 干扰管理和服务质量驱动的跨层资源分配[J]. 聊城大学学报(自然科学版),2025,38(1):1-13.

Citation format:LIU Huanlin,ZHOU Huiling,CHEN Yong,et al. Cross-layer resource allocation based on interference management and QoS-driven for VLC-WiFi network [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition),2025,38(1):1-13.

文章编号 1672-6634(2025)01-0001-13

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024030007

VLC-WiFi 干扰管理和服务质量驱动的跨层资源分配

刘焕淋¹,周会凌¹,陈勇²,黄冰川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 可见光通信(VLC)和无线保真(WiFi)组网被认为是实现未来 6G 移动通信的关键技术之一。为了提高室内资源分配满足业务服务质量(QoS)需求的概率,该文提出一种基于干扰管理和服务质量(QoS)驱动的跨层资源分配机制(CRAMIMQ)。该机制能根据物理层的信道状态与媒体访问控制层的队列状态,设计下行 VLC-WiFi 传输链路的自适应 QoS 级别评估方法和信道质量管控方法;提出基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制以满足业务的 QoS 需求。仿真结果显示,相比 QoS 感知的跨层动态资源分配(QoS-CLDRA)方法,所提 CRAMIMQ 提高了业务接入成功概率,进而使最大的系统吞吐量约提高 5.64%,VLC 缓冲队列长度减小 21.8%。

关键词 可见光通信;异构网络;资源分配;干扰管理;服务质量

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Cross-Layer Resource Allocation Based on Interference Management and QoS-Driven for VLC-WiFi Network

LIU Huanlin¹, ZHOU Huiling¹, CHEN Yong², HUANG Bingchuan¹

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract Visible Light Communication (VLC) and Wireless Fidelity (WiFi) network are considered one of the key technologies for future 6G mobile communication. So a Cross-layer Resource Allocation Mechanism based on Interference Management and QoS-driven (CRAMIMQ) is proposed to improve the probability that allocating resource can meet service's quality of service (QoS) requirement. According to the channel state of the physical layer and the queue state of the media access control layer in VLC-WiFi network, an adaptive QoS level evaluation of VLC-WiFi transmission downlink and channel's quality control method are designed in proposed CRAMIMQ. Then a cross layer resource allocation method based on interference management and QoS driven is put forward to meet the QoS requirements of service. Compared to the QoS-aware cross-layer dynamic resource allocation (QoS CLDRA) method, The simulation results show that proposed CRAMIMQ can improve the successful probability of service access, and achieve a

收稿日期:2024-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(NSFC 51977021);重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0734)资助

通信作者:刘焕淋,女,汉族,博士,教授,博士生导师,研究方向:可见光通信,E-mail:liuhl@cqupt.edu.cn.

maximum system throughput increase of 5.64% and a 21.8% reduction in VLC buffer queue length approximately.

Key words visible light communication; heterogeneous networks; resource allocation; interference management; quality of service

0 引言

近年来,随着 5G 的商用部署和 6G 应用需求增长,越来越多室内智能终端的多样性应用迫切需要室内提供带宽和时延保证的通信服务^[1,2]。可见光通信(VLC, Visible Light Communication)技术以其超宽可用频带、超高传输速率、抗电磁干扰和便捷的室内覆盖成为实现 6G 的不可或缺通信方式^[3]。采用多色发光二极管(LED, Light Emitting Diode)^[4]构成的 VLC 系统能以更高的速率满足 6G 核心需求的“全频谱、全覆盖、全应用”的目标,助力“万物智联”的实现和保障室内大数据通信的质量。

相比单色 LED,多色 LED 形成的多入多出系统的传输效率可以提高数倍^[4,5]。为了解决多色 LED 的信道估计不完美和串扰问题,文献[5]采用深度学习方法研究和验证了多色 VLC 收发器之间的色分调制方式对接收符号正确性和系统传输效率的影响,得到多色 VLC 可以极大地提高系统效率,具有显著的实用和商业前景。陈等^[6]进一步验证了多色 LED 采用软频分复用方法将红色(R, Red)、绿色(G, Green)和蓝色(B, Blue)颜色的载波分为用户的主载波和副载波,在采用匹配博弈方法将主、副载波分给用户,验证了多色 VLC 技术是提高单色 VLC 系统吞吐量的重要途径。另外,同时,在室内存在行人走动、家具布局和房屋结构等导致光线阻断,结合绕射能力更好且普及的无线保真(WiFi, Wireless Fidelity)辅助通信^[7],形成的 VLC-WiFi 异构网络能发挥 VLC 和 WiFi 各自的优势互补,为室内应用提供数据不间断传输的通信功能。

通过提高 VLC 网络资源的利用率可以进一步提高系统的吞吐量。Aboagye 等^[8]研究了 VLC-RF(Frequency Radio)中 AP 接入与功率分配的联合优化问题,提出基于匹配理论的分布式算法与基于用户最小需求速率的启发式功率分配算法获得问题的次优解。Narmanlioglu 等^[9]研究了以用户与相邻 AP(Access Point)之间的增强信干噪比(SINR, Signal to Interference and Noise Ratio)偏移量构建 VLC AP 小区的切换机制,能提高 VLC-RF 系统性能和降低小区切换的开销。Borah 等^[10]提出基于用户位置的动态功率分配机制,该机制允许 AP 动态地改变分配给用户的传输功率,减轻了异构网络中的 ICI(Inter-Carrier Interference)影响。Demir 等^[11]考虑室内多用户 VLC 接入网的跨层资源管理,建立随机跨层优化模型,解析在队列稳定性的约束下提高系统的吞吐量的方法。

为提高具有时延需求的业务接入成功率,刘等^[12]研究了 VLC-WiFi 物理层的链路传输性能与媒体访问控制(MAC, Media Access Control)层的缓存时延性能对传输链路的服务质量(QoS, Quality of Service)评估方法,提出一种 QoS 感知的跨层动态资源分配方法(QoS-CLDRA, QoS-aware Cross-Layer Dynamic Resource Allocation),该方法将数据包的 QoS 需求级别分为高、中和低三个等级,其传输链路的 QoS 级别由链路的带宽、SINR 和时延确定,其中仅仅链路的 SINR 做了整形规范,没有对传输链路带宽和缓存时延做整形规范。Moosavi 等^[13]将有效容量概念引入到异构云无线接入网中,提出了一种基于分布式稳定匹配和逐次凸算法的高效资源分配方案,在保证所有服务的时延 QoS 要求的同时实现资源的能效最大化。Wu 等^[14]提出基于负载均衡的一种单 AP 关联的迭代算法(SAIA, Single-AP Association Iterative Algorithm)最小化 VLC-WiFi 的丢包率和时延,该方法的接收端根据信号强度接入能提供最佳信道质量和缓存时延小的 VLC AP。杨等^[15]提出基于时延补偿的改进比例公平算法(IPFADC, Improved Proportional Fair Algorithm with Delay Compensation),该算法以比例公平算法为基础,调整时延临期业务的调度优先级和重载小区的业务调度因子,满足业务的时延性能,以提高业务接入成功率和系统吞吐量。

综上所述,针对室内 VLC-WiFi 异构网络中兼顾业务接入成功率和保障业务时延性能的跨层资源分配方法鲜有研究,本文设计了一种基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制(CRAMIMQ, Cross-layer Resource Allocation Mechanism based on Interference Management and QoS-driven),该机制能根据用户数据包 QoS 需求级别择下行传输链路,在提升系统下行传输的系统吞吐量性能的同时保障业务的时延性能。

1 系统模型与问题描述

图 1 为 VLC-WiFi 异构网络模型图,在室内天花板上密集部署多个 VLC AP 用于下行数据传输,1 个 WiFi AP 用于实现上行数据传输和光线阻断的下行数据传输,每个 VLC AP 均由多色 LED 阵列构成,多色 LED 阵列发出 R、G 和 B 三色光,通过合成 RGB 颜色光实现稳定的白光照明,每个用户接收端均配备多端口接收的光电探测器(PD, Photoelectric Detector)和滤光片接收和处理来自 VLC AP 的多色光信号^[4-6]。各多色 VLC AP 与 WiFi AP 通过电力线连接到控制中心,实现控制中心和各 AP 之间的数据传输,最后通过有线或无线线路连接到互联网^[13]。

1.1 VLC 信道传输特性

在图 1 中,设 VLC AP 的多色 LED 阵列是具有朗伯辐射模式的点光源,而光信号的下行传输主要依靠 LED 的视线(LoS, Line of Sight)链路,用户接收到光信号后进行滤波和处理,获得发端用户的数据^[3,9,16]。

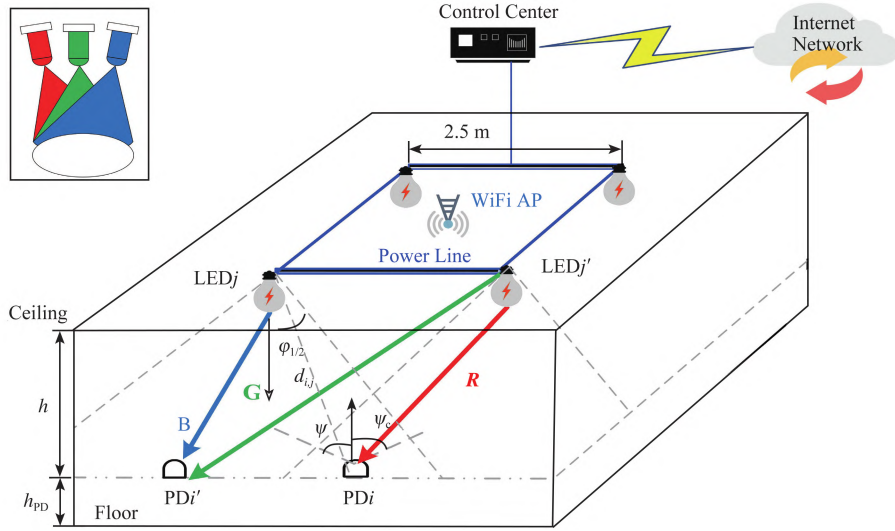


图 1 室内 VLC-WiFi 异构网络模型

Fig. 1 Indoor VLC-WiFi heterogeneous network model

则 VLC AP 的 LED j 到用户 i 之间的 LoS 信道增益可表示为^[17]

$$H_{i,j}^V = \begin{cases} \frac{(m+1)A_{PD}}{2\pi d_{i,j}^2} \cos^m(\theta) \cos(\psi) g(\psi) T(\psi), & 0 \leq \psi \leq \psi_c, \\ 0, & \psi > \psi_c, \end{cases} \quad (1)$$

式中 A_{PD} 表示光接收机(PD)的接收面积;朗伯辐射系数 $m = -\ln 2 / \ln[\cos(\theta_{1/2})]$, $\theta_{1/2}$ 是 LED 的半功率角; $d_{i,j}$ 是用户 i 到 LED j 之间的直线距离, $i \in U, j \in A_V, U$ 为用户集合, A_V 为 VLC-WiFi 网络中 VLC AP 集合, A 为 VLC AP 和 WiFi AP 集合, $A_V \subset A$; θ 为 LED 的发射角, ψ 为 PD 的接收角; ψ_c 为接收机视场角(FoV, Field of View); $T(\psi)$ 为接收器的光滤波增益; $g(\psi)$ 为接收器的光聚合增益。

则 VLC AP j 到用户 i 的接收 SINR 为^[18]

$$\xi_{i,j}^V = \frac{(\gamma P_{i,j}^V H_{i,j}^V)^2}{\sigma_s^2 + \sigma_t^2 + \sum_{k \in A_V, k \neq j} (\gamma P_{i,k}^V H_{i,k}^V)^2}, \quad (2)$$

式中 γ 为 PD 的光电转换系数, LED 中不同颜色对应的光电转换系数不同^[3]; $P_{i,j}^V$ 是 VLC AP j 上分配给接收用户 i 的光发射功率; σ_s^2 为散粒噪声; σ_t^2 为热噪声。

因此, VLC AP j 为用户 i 提供的最大可达数据速率为^[19]

$$R_{i,j}^V = B_{i,j}^V \log_2 \left(1 + \frac{e}{2\pi} \xi_{i,j}^V \right), \quad (3)$$

式中 $B_{i,j}^V$ 为 VLC AP j 分配给用户 i 的信道带宽。

1.2 WiFi 信道传输特性

采用 IEEE 802.11 修正 WiFi 信道传播模型, WiFi AP j 到用户 i 之间的信道增益为^[20]

$$H_{i,j}^W = \sqrt{10^{\frac{-L(d_{i,j})}{10}}} h_r, \quad (4)$$

式中 h_r 是小尺度衰落增益, 服从平均功率为 2.46 dB 的瑞利分布; $L(d_{i,j})$ 为大尺度衰落损耗, 单位为 dB, 其表达式为^[21]

$$L(d_{i,j}) = \begin{cases} L_{FS}(d_{i,j}) + X_\sigma, & d_{i,j} < d_{ref}, \\ L_{FS}(d_{ref}) + 35\lg\left(\frac{d_{i,j}}{d_{ref}}\right) + X_\sigma, & d_{i,j} \geq d_{ref}, \end{cases} \quad (5)$$

式中 $L_{FS}(d_{i,j})$ 为自由空间路径损耗, 其表达式为 $L_{FS}(d_{i,j}) = 20\lg(f_c d_{i,j}) - 147.5$, 单位为 dB; 阴影衰落 X_σ 是零均值高斯随机变量, 标准差为 3 dB; f_c 为 WiFi AP 的中心载波频率, 其值为 2.4 GHz; $d_{i,j}$ 为 WiFi AP j 到用户 i 的通信链路距离; d_{ref} 为参考距离。

接入 WiFi AP 的用户采用频分复用方式获得工作频率, 则 WiFi AP j 到用户 i 的信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 为

$$\xi_{i,j}^W = \frac{P_{i,j}^W |H_{i,j}^W|^2}{N_0^W B_{i,j}^W}, \quad (6)$$

式中 $P_{i,j}^W$ 为 WiFi AP j 分配给用户 i 的电发射功率; N_0^W 为 WiFi 背景噪声功率谱密度, 值为 -174 dBm/Hz^[21]; $B_{i,j}^W$ 为 WiFi AP j 服务于用户 i 的信道带宽。

根据香农公式, 则 WiFi AP j 为用户 i 提供的最大可达数据速率为^[22]

$$R_{i,j}^W = B_{i,j}^W \log_2(1 + \xi_{i,j}^W). \quad (7)$$

1.3 等效 SNR

由于 VLC 与 WiFi 是不同通信接入技术, 用户接收相同的光功率或电功率, 获得最大可达速率不一样, 因此, 采用基于相同最大可达速率, 提出 VLC 的 SINR 等效转换 WiFi SNR 方法^[23], 则 VLC AP j 到用户 i 的 WiFi 等效 SNR 为

$$\xi_{i,j}^{V \rightarrow W} = \Gamma_W \left(\left(1 + \frac{\xi_{i,j}^{VLC}}{\Gamma_V} \right)^{\frac{B_{i,j}^V}{B_{i,j}^W}} - 1 \right), \quad (8)$$

式中 Γ_W 为 WiFi 的信道编码损耗因子, Γ_V 为 VLC 网络的信道编码损耗因子。

1.4 问题描述

在室内 VLC-WiFi 异构网络中, 控制中心根据信道状态信息和队列状态信息, 为用户选择满足差异化时延需求的缓冲队列、AP 及合适的子载波信道, 可以提高业务进入成功率和降低缓存时延, 进而提高系统吞吐量, 则本文的优化目标为

$$\begin{aligned} \max_{u_{i,j}^V, u_{i,0}^W} \quad & \sum_{i=1}^{|U|} \left(\sum_{j=1}^{|A_V|} u_{i,j}^V R_{i,j}^V + u_{i,0}^W R_{i,0}^W \right), \\ \text{s. t.} \quad & C1: u_{i,j}^V, u_{i,0}^W \in \{0, 1\}, \forall i \in U, \forall j \in A_V; \\ & C2: \sum_{i=1}^{|U|} B_{i,j}^V u_{i,j}^V \leq B^V, \forall j \in A_V; \\ & C3: \sum_{i=1}^{|U|} B_{i,0}^W u_{i,0}^W \leq B^W; \\ & C4: B_{i,j}^V, B_{i,0}^W \geq 0, \forall i \in U, \forall j \in A_V; \\ & C5: \sum_{i=1}^{|U|} P_{i,j}^V \leq P^V, \forall j \in A_V; \\ & C6: \sum_{i=1}^{|U|} P_{i,0}^W \leq P^W; \\ & C7: P_{i,j}^V, P_{i,0}^W \geq 0, \forall i \in U, \forall j \in A_V. \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $u_{i,j}^V = 1$ 表示 VLC AP j 与用户 i 之间建立了连接,反之,没有建立连接; $u_{i,0}^W = 1$ 表示 WiFi AP 与用户 i 之间建立连接; $|U|$ 为用户数目; $|A_v|$ 为 VLC AP 数目; B^V 为 LED 通信带宽, B^W 为 WiFi 系统带宽; P^V 为 LED 的发射功率; P^W 为 WiFi AP 的发射功率。C2 与 C3 是 VLC AP 与 WiFi AP 的总带宽约束, C4 是分配给用户的带宽非负性约束; C5 与 C6 是 VLC AP 与 WiFi AP 的总功率约束; C7 是用户功率非负性约束。随着用户的业务请求动态到达和离开系统,再考虑用户业务的 QoS 性能,式(9)被证明是 NP 难问题^[12,14],基于此,本文提出基于干扰管理的 QoS 驱动的跨层资源分配机制(CRAMIMQ),该方法根据 MAC 层提供的队列状态信息(QSI, Queue State Information)和物理层通过上行信道反馈提供的信道状态信息(CSI, Channel State Information),在干扰管理和 QoS 驱动的基础上,通过优化跨层资源的分配提高系统的性能。

2 基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制

本文所提 CRAMIMQ 包含三部分:判定用户数据包的 QoS 需求级别,评估下行 VLC-WiFi 传输链路的自适应 QoS 级别和基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配。在图 2 中,控制中心负责数据接收、功率和资源分配,及实现物理层和媒体接入控制(MAC, Medium Access Control)层之间的信息交互^[12,24];控制中心通过发送 IEEE 802 协议的 MAC 数据包,探测物理层的 CSI 包括用户位置、用户接收 SINR 等的信道性能等参数^[12,25],MAC 层的 QSI 提供了关于数据包性能需求的信息。本文考虑基于数据包的流量到达模型,具有随机到达时间的用户数据包经过互联网到达控制中心,之后被存储到缓冲队列中,并采用先到先服务规则调度,通过 AP 发送队列中数据包给用户。为避免同频干扰,每个 VLC 的可见光波段仅服务一个用户,但一个用户可以使用一个 VLC AP 的多个可见光波段,也可使用多个 VLC AP 的不同频率可见光波段,用户还能连接 WiFi AP。CRAMIMQ 的流程图如图 3 所示。

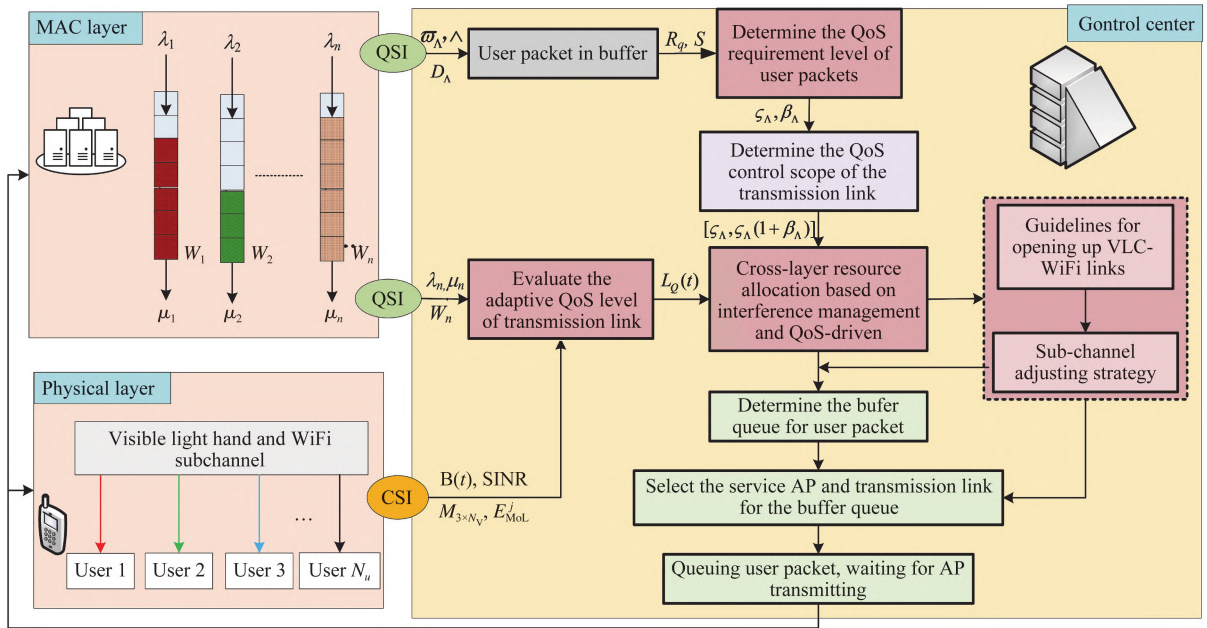


图 2 CRAMIMQ 方框图

Fig. 2 Block diagram of CRAMIMQ

下面说明图 2 中各符号和参数含义或计算方法。在图 2 中,每个缓冲队列 W_n 都与一条下行传输链路对应,在单位调度周期内,用户数据包到达控制中心的各 AP 缓冲队列,其时延主要由室内地面位置与控制中心的距离确定,在室内可忽略该值^[12,24]。因此,当到达缓冲队列 W_n 的用户数据包数目为 λ_n 时,则离开缓冲队列 W_n 的用户数据包数目^[24]

$$\mu_n = R_q \times T_s / S, \quad (10)$$

式中 R_q 为缓冲队列 W_n 的下行链路的可达传输速率,若下行传输链路为 VLC 链路, R_q 值由式(3)计算,若为 WiFi 链路,其值由式(7)计算; T_s 为调度周期值; S 为数据包的大小。

在 $t+1$ 时刻,缓冲队列 W_n 的队列长度需满足^[26]

$$L_n(t+1) \leq \max[L_n(t) - \mu_n(t), 0] + \lambda_n(t), \quad (11)$$

式中 $L_n(t)$ 为 t 时刻缓冲队列 W_n 的队列长度,且 $L_n(t) \leq L_B$, L_B 为缓冲区长度; $\mu_n(t)$ 为 t 时刻离开缓冲队列 W_n 的数据包数目; $\lambda_n(t)$ 为 t 时刻到缓冲队列 W_n 的数据包数目;队列稳定条件为 $\mu_n(t) \leq L_n(t)$ 。

图 3 所示为 CRAMIMQ 处理用户数据包到达 VLC-WiFi 网络的过程。首先,控制中心首先读取该数据包的载荷类型,判定用户数据包的 QoS 需求级别及所需传输链路的 QoS 质量管控范围;其次,根据用户数据包的 MAC 地址,获得用户的位置信息,查询数据包的目的用户的物理层信道状态信息与 MAC 层队列状态信息,评估传输链路的自适应 QoS 级别需求;然后,执行基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制,采用 VLC-WiFi 传输链路开辟准则,为数据包选择合适的缓冲队列和传输链路,调度用户数据包进入到对应缓冲队列,排队等待所选 AP 发送。

2.1 判定用户数据包的 QoS 需求级别

根据第三代合作伙伴计划(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)宣布 5G R17 标准,其规定了标准化 5G QoS 标识(5QI, 5G QoS Identifier)到 5G QoS 特征的映射,5G QoS 特征可被理解成为每种业务类型设置的特定参数准则,不同的 5QI 值对应着不同业务类型的默认优先级及数据包缓存时延需求。在室内 VLC-WiFi 异构网络中,基于用户数据包的业务类型,控制中心将根据用户数据包的默认优先级映射为数据包的 QoS 需求级别为

$$\zeta_\Lambda = e^{-\zeta_1 \cdot \bar{\omega}_\Lambda}, \quad (12)$$

式中 ζ_Λ 为用户数据包 Λ 的 QoS 需求级别; ζ_1 为 QoS 控制曲线形状的参数; $\bar{\omega}_\Lambda$ 为 Λ 的默认优先级。当用户数据包的 $\bar{\omega}_\Lambda$ 值较小时,则 QoS 需求级别变化较为迅速;反之, QoS 需求级别变化缓慢。

参考 5QI 到 5G QoS 特征的映射方法,考虑数据包较小和较大对信道传输及时性更加严格,而居中的数据包长可以容忍信道较长的传输时延,为此,我们设计居中长度数据包容忍最大时延的 QoS 质量管控因子

$$\beta_\Lambda = \frac{(D_{\max} - D_\Lambda)(D_\Lambda - D_{\min})}{(D_{\max} - D_{\min})^2}, \quad (13)$$

式中 $D_{\min}$ 和 $D_{\max}$ 分别为 5QI 到 5G QoS 特征映射中定义的最小数据包和最大数据包时延需求值; D_Λ 为 Λ

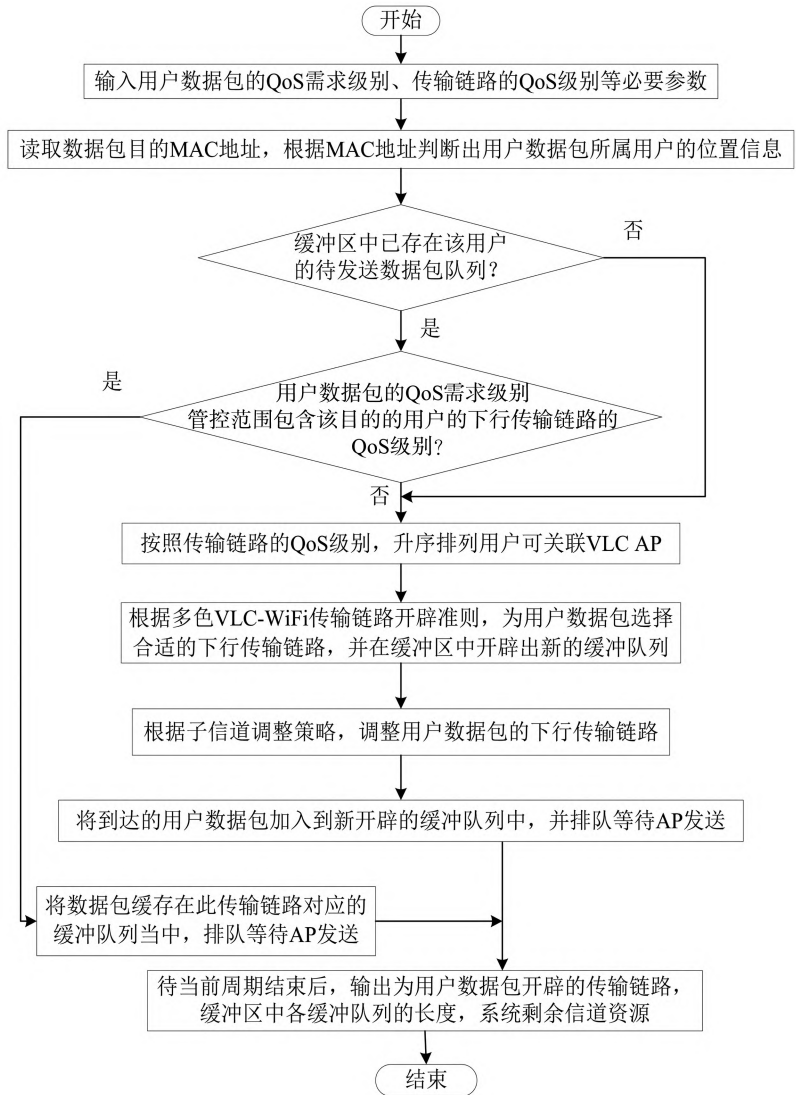


图 3 CRAMIMQ 流程图

Fig. 3 Flow chart of CRAMIMQ

的数据包缓存时延值,其中,数据包时延包括数据包的传输时延和缓存时延,主要由数据包在队列中的缓存时延决定,由于室内用户到控制中心和各用户到控制中心距离差都很小,因此,我们认为可以忽略这里的传输时延值,从而专注于数据包的排队缓存时延值。则用户数据包选择传输链路的 QoS 质量管控范围为 $[\zeta_\Lambda, \zeta_\Lambda(1+\beta_\Lambda)]$ 。

2.2 评估下行 VLC-WiFi 传输链路的自适应 QoS 级别

为满足业务的 QoS 传输需求, VLC-WiFi 下行传输链路 QoS 级别判定方法需要综合考虑缓存时延性能与传输链路的传输性能。为了对缓存时延性能进行评价,本文考虑缓存时延满意度函数,其表达式为

$$U_{\text{delay}}(D(t)) = \frac{1 + e^{-\zeta_2 \times d_{\min}}}{1 + e^{-\zeta_2 \times (d_{\min} - D(t))}}, \quad (14)$$

式中 ζ_2 为时延控制曲线形状的参数^[27]; $D(t)$ 为数据包从队列的末尾排到队列的首位所经历的时间,即数据包的缓存时延,单位为 s; $d_{\min}$ 为缓存时延性能的最低要求,即时延阈值。缓存时延性能随着时延的增大而减小,当传输时延低于 $d_{\min}$ 时,传输链路的性能较好,当 $D(t)$ 逐渐接近 $d_{\min}$ 时,式(14)的导数逐渐增大;当 $D(t)$ 远离 $d_{\min}$ 时,式(14)的导数逐渐减小。式(14)为非对称的反 S 型函数。针对此传输链路对应的缓冲队列, $D(t)$ 为

$$D(t) = L_n(t) \cdot S / R_q. \quad (15)$$

数据传输速率由链路传输带宽与 SINR 决定,引入带宽满意度函数^[28],其表达式为

$$U_{\text{bw}}(B(t)) = \frac{[B(t)]^{\zeta_3}}{[B(t)]^{\zeta_3} + (b_{\min})^{\zeta_3}}, \quad (16)$$

式中 $B(t)$ 为传输链路的传输带宽值; $b_{\min}$ 为传输带宽阈值; ζ_3 为带宽控制曲线形状的参数。显然,传输带宽性能随着带宽的增大而增大,当 $B(t)$ 接近 $b_{\min}$ 时,式(16)的导数增大;当 $B(t)$ 远离 $b_{\min}$ 时,式(16)的导数逐渐减小;当 $B(t)$ 小于 $b_{\min}$ 时,传输带宽性能 $U_{\text{bw}}(B(t))$ 值较低。

类似地,参考带宽满意度函数整形思路,改进的链路的 SINR 满意度函数整形为

$$U_{\text{sinr}}(P(t)) = \frac{[P(t)]^{\zeta_4}}{[P(t)]^{\zeta_4} + (p_{\min})^{\zeta_4}}, \quad (17)$$

式中 $p_{\min}$ 为 SINR 阈值; $P(t)$ 为传输链路的 SINR,若传输链路为 VLC 下行传输链路,利用式(7)可对其 SINR 进行等效 SNR 转化; ζ_4 为 SINR 曲线形状控制参数^[28]。当 $P(t)$ 接近 $p_{\min}$ 时,式(17)导数增加,当 $P(t)$ 远离 $p_{\min}$ 时,式(17)导数减小,当 $P(t)$ 小于 $p_{\min}$ 时, $U_{\text{sinr}}(P(t))$ 值较低。

综合考虑用户对链路的整形后带宽满意度和 SINR 满意度,由香农公式,则链路的传输速率整形后为

$$U_{\text{rate}}(R(t)) = U_{\text{bw}}(B(t)) \cdot \log_2[1 + U_{\text{sinr}}(P(t))], \quad (18)$$

式中 $U_{\text{rate}}(R(t))$ 为链路传输性能, $U_{\text{bw}}(B(t))$ 和 $U_{\text{sinr}}(P(t))$ 分别由式(16,17)计算。

综合考虑缓存时延性能与链路的传输性能,本文设计的传输链路 QoS 级别评估公式为

$$L_Q(t) = \frac{1}{2}(\delta_1 + \omega) \cdot U_{\text{delay}}(D(t)) + \frac{1}{2}(\delta_2 + 1 - \omega) \cdot U_{\text{rate}}(R(t)), \quad (19)$$

式中 δ_1 和 δ_2 的表达式如式(20)和式(21), $\delta_1, \delta_2 \in [0, 1]$; δ_1 表示缓存时延性能所占的自适应权重值, δ_2 表示链路传输性能所占的自适应权重值; ω 为缓存时延偏好因子, $\omega \in [0, 1]$ 。

$$\delta_1 = \frac{U_{\text{delay}}(D(t))}{U_{\text{delay}}(D(t)) + U_{\text{rate}}(R(t))}, \quad (20)$$

$$\delta_2 = \frac{U_{\text{rate}}(R(t))}{U_{\text{delay}}(D(t)) + U_{\text{rate}}(R(t))}. \quad (21)$$

2.3 基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制

基于用户数据包的 QoS 需求级别,联合下行 VLC-WiFi 传输链路的自适应 QoS 级别评估,本文设计了基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配机制,其过程如表 1 所示。

表 1 CRAMIMQQ 具体过程
Tab. 1 The process of CRAMIMQ

输入	用户数据包 Λ 的 ζ_A, D_A , VLC AP 集合 A_V , 各缓冲区队列和资源使用状态, 各传输链路的 QoS 级别 $L_Q(t)$, 各 VLC AP 的单个带宽为 20×3^{-1} MHz, 发射功率为 20×3^{-1} W 和其他光辐射参数, WiFi AP 参数, 用户集合 U , $D_{\max}$ 和 $D_{\min}$ 值, 设置 $\omega = 1, d_{\min}, b_{\min}, p_{\min}$ 。
输出	为用户数据包开辟的传输链路, 缓冲区中各缓冲队列的长度, 系统剩余信道资源, 可见光波段分配矩阵 $M_{3 \times N_V}$ 。
(1) 读取用户数据包的目的 MAC 地址, 根据 MAC 地址判断出用户数据包所属用户的位置信息; (2) 若缓冲区中存在属于数据包的目的用户的缓冲队列, 转到步骤(3), 否则, 转到步骤(4); (3) 由式(13), 计算用户数据包的 QoS 需求级别管控因子 β_A, 确定链路质量管控范围 $[\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 若当前队列的链路 $L_Q(t) \in [\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 则将用户数据包缓存在此传输链路对应的缓冲队列当中, 排队等待 AP 发送, 转到步骤(8), 否则, 转到步骤(4); (4) 根据式(19), 在假定无小区间干扰的情况下, 依次计算目的用户与可关联 VLC AP 之间的无干扰传输链路的 QoS 级别 $L_Q(t)$, 若 $L_Q(t) \in [\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 根据 $L_Q(t)$ 值, 升序排列用户的候选 VLC AP; 否则, 若所有 VLC AP 的 $L_Q(t)$ 已遍历, 转步骤(5), 否则, 转步骤(4); (5) 执行表 2 所示的 VLC-WiFi 传输链路开辟准则, 为用户数据包选择合适的下行传输链路, 并在缓冲区中开辟新的缓冲队列; (6) 执行表 3 所示的子信道调整策略, 调整用户数据包的下行传输链路; (7) 将用户数据包加入到新开辟的缓冲队列中, 并排队等待 AP 发送; (8) 待当前周期结束后, 输出为用户数据包开辟的传输链路, 更新缓冲区中各缓冲队列的长度, 系统剩余信道资源。	

在表 1 中, $M_{3 \times N_V}$ 为可见光波段分配矩阵, $m_{k,j} = i$ 表示 VLC AP j 的可见光波段 k 分配给了用户 i , 其中 $k \in \{1, 2, 3\}$, 对应 R、G、B 可见光波段, 若无波段分配给用户, 则 $m_{k,j} = 0$ 。

2.3.1 VLC-WiFi 传输链路开辟准则。VLC-WiFi 传输链路开辟准则的步骤如表 2 所示, 其基本设计思想是, 利用标签矩阵判断传输链路的开辟是否会对现有传输链路的 QoS 级别产生影响, 优先选择不会造成影响的传输链路开辟给新用户。

在室内 VLC-WiFi 异构网络中, 影响传输链路的 QoS 性能的主要因素包括队列缓存时延和 SINR, 而影响 SINR 的主要因素来自小区间干扰。为了分析 ICI, 本文设定用户 i 获得链路信息的标签矩阵为 C_{MoL}^i , 其 3 色维度为 $|K_i| \times 3$, 其中, K_i 为用户 i 的可关联 VLC AP 集合, 每个可关联 VLC AP 的 3 个子列依次表示红光、绿光及蓝光波段使用情况, C_{MoL}^i 的元素值为 0 或 1, 当 VLC AP j 将红光波段分配给用户 i , 则用户 i 的标签矩阵 C_{MoL}^i 的第 1 列元素值为 1; 同时, 设置 VLC AP j 可关联的候选用户的标签矩阵为 E_{MoL}^j , 其维度为 $|H_j| \times 3$, 其中, H_j 为 VLC AP j 的可关联用户集合, 每个可关联用户有 3 个子列, 依次对应红光、绿光及蓝光波段, E_{MoL}^j 的元素值为 1 或 0, 当 E_{MoL}^j 的某列元素值为 1, 表示该列对应的 VLC AP 的波段资源已经分配给用户使用。为了避免 ICI, VLC AP 的每个颜色最多分配给一个用户, 每个用户可以接收多个 VLC AP 的不同颜色的波段, 形成聚集信道分配给需要的用户使用。

2.3.2 子信道调整策略。子信道调整的目的是调整 VLC-WiFi 传输链路开辟的不满足数据包 QoS 质量管控范围的传输链路和对其他已开辟传输链路形成干扰或降低已开辟传输链路 QoS 的传输链路。针对不同的传输链路开辟标签, 执行不同的子信道调整方法, 子信道调整策略如表 3 所示。

所提 CRAMIMQ 的时间复杂度主要: 针对多色 VLC-WiFi 传输链路开辟准则, 需要遍历 VLC AP 集合 A 以对目的用户的可关联 VLC AP 进行排序; 接着, 选定一个 VLC AP, 检查其是否存在剩余可见光波段; 然后, 观察此 VLC AP 的标签矩阵的一列中是否存在有值为 1 的元素, 其时间复杂度为 $O(|U| \times |A| \times 3)$; 针对子信道调整策略, 需要遍历 VLC AP 集合 A 以筛选出位于指定 SINR 范围内的 VLC AP 和特定颜色的剩余可见光波段, 并在此 VLC AP 的标签矩阵中, 判断与此可见光波段对应的一列有无值为 1 的元素。因此, 其时间复杂度为 $O(|U| \times |A| \times 3)$ 。综上所述, CRAMIMQ 的最大时间复杂度为 $O(2 \times |U| \times |A| \times 3)$ 。可见, 所提的时间复杂度与用户数目 $|U|$ 和 AP 数目 $|A|$ 一次幂成正比, 复杂度较低。

表 2 VLC-WiFi 传输链路开辟准则

Tab. 2 Guidelines for opening up VLC WiFi transmission links

输入	用户数据包A的 QoS 需求 ζ_A, D_A , 依无干扰链路 QoS 级别 $L_Q(t)$ 排序的候选 VLC AP 集, 时延阈值 $d_{\min}$, 带宽阈值 $b_{\min}$, SINR 阈值 $p_{\min}$, 各 VLC AP 的 E_{Mol}^i , WiFi AP 参数和剩余资源值, 用户集, 设置 $\omega=1$ 。
输出	为用户数据包开辟的传输链路, 缓冲区中各缓冲队列的长度, 可见光波段分配矩阵 $\mathbf{M}_{3 \times N_V}$ 。
(1) 根据数据包的目的用户的可关联 VLC AP 的无干扰 $L_Q(t)$ 排序情况, 依次选择未遍历的第一个 VLC AP j, 若 VLC AP j 存在空闲可见光波段资源, 转步骤(2), 否则, 若所有可关联 VLC AP 遍历完, 转步骤(9); 否则, 转步骤(1); (2) 按照 RGB 顺序选择一个未遍历的可见光波段, 若该 VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j 的光波段对应列有值为 1 的元素, 表示该波段已经分配给其他用户, 转步骤(3), 否则, 转步骤(7); (3) 若用户的候选 VLC AP j 的可见光波段遍历完, 转步骤(4), 否则, 转到步骤(2); (4) 对用户的候选 VLC AP j, 计算其 E_{Mol}^j 各列的元素值和, 找出元素值和最小的列对应的 VLC AP j 可见光波段; (5) 根据式(19), 计算数据包所属的目的用户与该 VLC AP j 所选波段的传输链路的 QoS 级别, 这里计算 $L_Q(t)$ 时考虑小区间干扰, 若 $L_Q(t) \in [\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 转步骤(6), 否则, 转信道调整策略; (6) 根据步骤(4)中选择的 VLC AP j 可见光波段, 为用户数据包A开辟该传输链路, 并在传输链路对应的缓冲区中开辟新缓冲队列, 对此传输链路上打上链路标签 3, 更新 C_{Mol}^i 元素值、VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j 元素值和 $\mathbf{M}_{3 \times N_V}$, 转信道调整策略; (7) 选择 VLC AP j 的该可见光波段, 由于该波段未分配给其他用户, 因此无小区间干扰, 根据式(20), 计算此传输链路的 QoS 级别值 $L_Q(t)$, 若 $L_Q(t) \in [\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 转步骤(8), 否则, 转步骤(9); (8) 基于步骤(7)选取的 VLC AP j 的无干扰可见光波段, 为用户数据包开辟传输链路, 并在传输链路对应的缓冲区中开辟缓冲队列, 对此传输链路上打上链路标签 1, 更新 C_{Mol}^i 元素值、VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j 元素值和 $\mathbf{M}_{3 \times N_V}$, 转到信道调整策略; (9) 从 WiFi AP 中选择一个空闲的子信道, 根据式(17), 计算 WiFi 传输链路的 QoS 级别值, 若该传输链路的 QoS 级别 $\in [\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 则转步骤(11), 否则, 转步骤(10); (10) 为用户数据包开辟 VLC AP j 的传输链路, 并在缓冲区中开辟该传输链路对应的缓冲队列, 对此传输链路上打上链路标签 2, 更新数据包的目的用户 C_{Mol}^i 元素值、VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j 元素值和 $\mathbf{M}_{3 \times N_V}$, 转信道调整策略; (11) 选择 WiFi 的空闲子信道, 为用户数据包开辟新的 WiFi 传输链路与对应的缓冲队列, 更新数据包的目的用户 C_{Mol}^i 元素值和 VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j 元素值, 输出数据包开辟的传输链路和缓冲队列信息, 算法结束。	

表 3 子信道调整策略

Tab. 3 Subchannel adjustment strategy

输入	用户数据包A的 QoS 需求 ζ_A, D_A , 传输链路标签状态, $d_{\min}, b_{\min}, p_{\min}$, 候选 VLC AP 集合及 VLC AP 的 E_{Mol}^i , WiFi AP 参数和剩余资源值, 用户集, 各 VLC AP 资源分配情况 $\mathbf{M}_{3 \times N_V}$ 。
输出	为用户数据包开辟的传输链路, 缓冲区中各缓冲队列的长度。
(1) 对没有选择 WiFi 传输信道的数据包, 根据数据包的 QoS 需求级别管控范围范围 $[\zeta_A, \zeta_A(1+\beta_A)]$, 由式(15), 分别计算对应的 SINR 值的上限和下限值; 由式(8), 确定数据包的目的用户和 VLC AP 之间 $\xi_{i,j}^V$ 上限和下限值; (2) 对 $L_Q(t)$ 中的各候选 VLC AP, 由式(2)计算数据包的目的用户与各候选 VLC AP 之间的 $\xi_{i,j}^V$ 值, 将不在 $\xi_{i,j}^V$ 上限和下限值之间和表 2 算法遍历过的 VLC AP 从 $L_Q(t)$ 中删除, 更新候选 VLC AP 集合并根据其无干扰的 $L_Q(t)$ 升序排列; (3) 若数据包所选传输链路具有链路标签 1 或链路标签 2, 转步骤(4), 否则, 转步骤(6); (4) 从候选 VLC AP 集合中, 若集合中存在: 有空闲可见光波段, 且该可见光波段的颜色与具有链路标签的可见光波段的颜色相同, 且该 VLC AP 的标签矩阵的该光波段对应列无值为 1 的元素的 VLC AP, 则转步骤(5), 否则, 维持原有为目的用户开辟的链路标签的传输链路, 转步骤(7); (5) 将满足条件的 VLC AP 的同色链路开辟为用户数据包的新传输链路, 删除原传输链路的链路标签, 更新目的用户 i 的标签矩阵 C_{Mol}^i 与新选 VLC AP j 的标签矩阵 E_{Mol}^j, 转步骤(7); (6) 若数据包所选传输链路具有链路标签 3, 在其候选 VLC AP 的标签矩阵 E_{Mol}^j 中, 找出列元素值和最小的一列, 在此列中, 针对元素值为 1 的用户集合, 找出距离数据包所属目的用户最近的一个用户, 重新计算出此用户的传输链路 QoS 级别, 若此用户的传输链路 QoS 级别仍在对应用户数据包的 QoS 需求级别管控范围内, 则维持原有为目的用户开辟的具有链路标签 3 的传输链路, 更新目的用户与选定 VLC AP 的标签矩阵, 转步骤(7); 否则, 转步骤(4), 为目的用户更新开辟的传输链路, 删除原链路标签 3; (7) 输出子信道调整后数据包的传输链路、缓冲区中各缓冲队列的长度和各 AP 的资源状态信息。	

3 仿真与分析

3.1 仿真环境及评价指标

本文使用蒙特卡洛仿真 CRAMIMQ 性能,相关仿真参数如表 4 所示,其中,4 个 VLC AP 矩形布局下均匀分布在室内天花板上,1 个 WiFi AP 位于天花板中央,如图 1 所示,各色可见光波段带宽为 $B^V/3$ MHz,红色、绿色和蓝色光波波段的功率分别为 $P^V \times 0.333$ W、 $P^V \times 0.38$ W 和 $P^V \times 0.287$ W;每个 WiFi 子信道的带宽为 1 MHz;用户数目范围为 $[1, 16]$,采用随机分布在室内环境中,在每个调度周期开始根据随机分布规律位置,系统仿真 600 个调度周期,对获得系统吞吐量、VLC 和 WiFi 缓冲队列长度的性能指标取统计平均值。图 4 为某个调度周期开始时用户分布位置和室内 4 个 VLC AP 矩形均匀布局示意图。

用户请求的数据包为 5QI 一类业务,其到达过程遵循指数为 λ 的泊松分布。本文将系统吞吐量、缓冲队列长度作为性能衡量指标,反映系统的资源调度水平和下行链路传输能力,对比算法为 QoS-CLDRA^[11]、SAIA^[14] 和 IPFADC^[15]。

表 4 仿真默认参数^[12, 14, 15, 23, 26, 29]

Tab. 4 Default parameters of simulation^[12, 14, 15, 23, 26, 29]

Parameter	Meaning	Value	Parameter	Meaning	Value
$L \times W \times H$	Room size	5 m × 5 m × 3 m	h_{PD}	Photodetector height	0.85 m
A_{PD}	Receiving area of PD	1 cm ²	θ	Half power angle	60°
P^V	Emission power of LED	20 W	ψ_c	Field of view	60°
B^V	Bandwidth of LED	40 MHz	P^W	Power of WiFi AP	20 dBm
$T(\psi)$	Optical filter gain	1	B^W	Bandwidth of WiFi AP	20 MHz
$g(\psi)$	Optical concentrator gain	8.36	$B_{i,0}^W$	Subchannel bandwidth	1 MHz
γ	O/E coefficient	Red: 0.44 A/W	d_{ref}	Reference distance	10 m
		Green: 0.23 A/W	Γ_W	WiFi encoding loss factor	3 dB
		Blue: 0.15 A/W	Γ_V	VLC encoding loss factor	3 dB
ζ_1	Shape factor of QoS	0.01	ζ_2	Shape factor of delay	4
ζ_3	Shape factor of bandwidth	5	ζ_4	Shape factor of SINR	5
ϖ_A	Default priority	1	b_{min}	Bandwidth threshold	2 MHz
d_{min}	Delay threshold	2 s	p_{min}	SINR threshold	5 dB
D_{min}	Minimum buffer delay	100 ms	D_{max}	Maximum buffer delay	2 100 ms
D_A	Buffer delay range	(100, 2 100) ms	S	Packet size	1 KB
T_s	Duration of a scheduling	1 s	L_B	Buffer size	128 KB

3.2 仿真结果及分析

在矩形布局下,LED 采用表 4 参数,则室内地面各位置中,测得 PD 接收平面接收光功率如图 5 所示,接收光功率为 $-3.74 \sim 2.04$ dBm,功率方差为 7.92 dBm。由图 5 可知房间中心和边缘区域的接收信号强度波动较大,分布极不均匀。在本文的研究中,处在边缘的用户可以接入资源更好的 VLC AP 或传输速率更

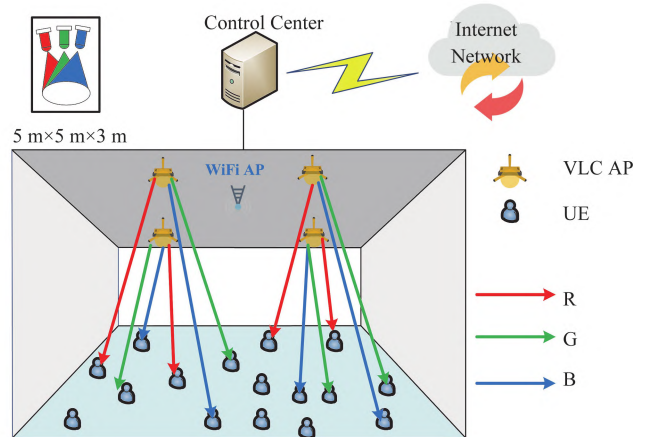


图 4 VLC AP 矩形布局下用户位置示意图

Fig. 4 User positions under rectangular layout of 4 VLC APs

好的 WiFi AP,还可以采用数据包缓存的方法,解决接收 LED 功率较低情况下的数据传输问题。

图 6 为 CRAMIMQ、QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法在 $|U|=16, \lambda=24$ 包每毫秒时 VLC 缓冲队列长度与缓存时延偏好因子的关系。当 ω 从 0 开始增加时,3 种算法的 VLC 缓冲队列长度均逐渐下降,这是因为当 $\omega=0$ 时,新到达的用户数据包选择传输性能好的传输链路,导致部分传输信号好的传输链路的缓冲队列较长,随着 ω 增加,用户数据包逐渐偏向于选择缓存时延性能较好的传输链路,用户数据包在 VLC 队列中堆积情况得到缓解,则系统中 VLC 缓冲队列长度开始减小。随着 ω 继续增加,传输链路的 QoS 级别评估更加依赖于缓存时延性能,新到达的用户数据包过于偏向缓存时延性能更好的传输链路,而错过一些缓存时延性能较差但传输性能较好的传输链路,用户数据包更易选择缓存时延性能好且传输性能差的传输链路,导致系统的链路速率降低,停留在缓冲区排队的用户数据包开始逐渐增多,VLC 缓冲队列长度缓慢上升。

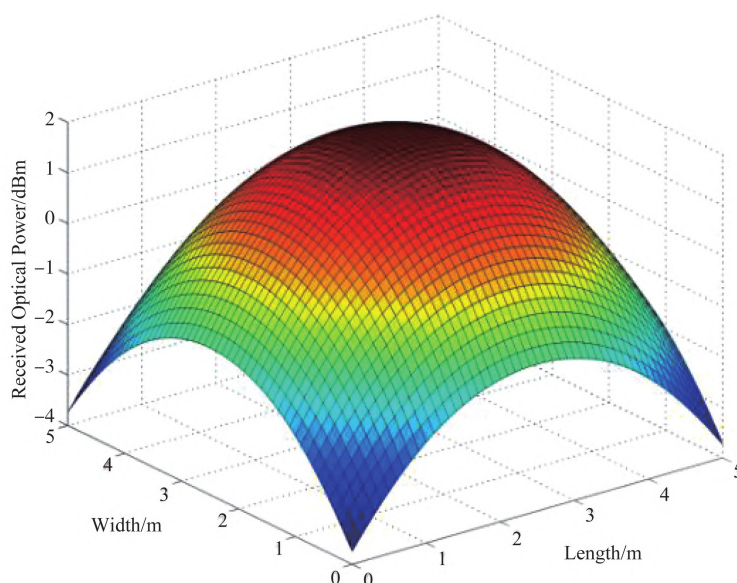


图 5 矩形布局下不同位置的接收光功率

Fig. 5 Received optical power at different positions under rectangular layout

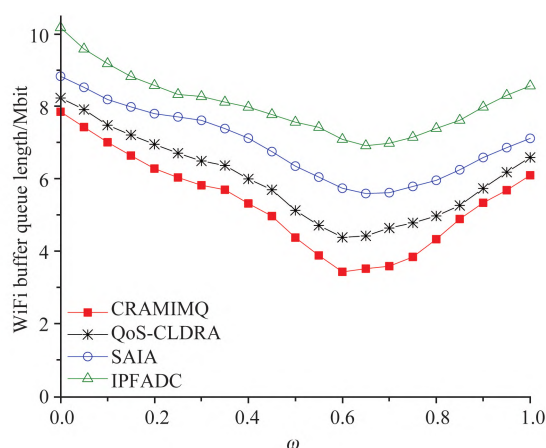


图 6 VLC 缓冲队列长度与缓存时延偏好因子关系

Fig. 6 VLC buffer queue length versus ω

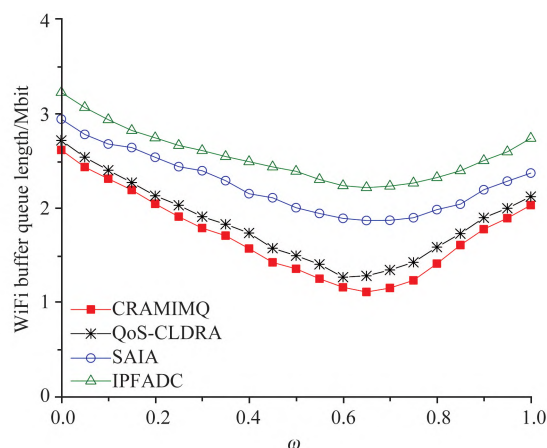


图 7 WiFi 缓冲队列长度与缓存时延偏好因子关系

Fig. 7 WiFi buffer queue length versus ω

相比 QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法,图 6 中的 ω 从 0 增加到 1,所提 CRAMIMQ 的队列长度最短;当 $\omega=0.6$ 时,CRAMIMQ 的 VLC 缓冲队列长度值最小,比 QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法的队列长度分别减少 21.8%、40.3%和 51.7%。这是因为:IPFADC 算法优先为队列中时延较大的用户分配资源,SAIA 算法按照队列缓存时延的大小为用户调整接入 QoS 级别最好的 VLC AP 传输链路,而 QoS-CLDRA 的数据包 QoS 评估和链路质量评估比较简单,而所提 CRAMIMQ 在跨层资源分配中,考虑了新开辟传输链路对其它传输链路的 QoS 影响,在系统干扰环境复杂时,CRAMIMQ 能为用户数据包选择更多质量管控范围内的传输链路,以减少系统 VLC 缓冲队列长度。

图 7 为 CRAMIMQ、QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法在 $|U|=16, \lambda=24$ 包每毫秒时 WiFi 缓冲队列长度与缓存时延偏好因子 ω 的关系。类似图 6,随着 ω 增加,所有算法的 WiFi 缓冲队列长度都逐渐下降,而后再逐渐上升,但 CRAMIMQ 的 WiFi 缓冲队列长度的下降趋势较为明显,且在相同 ω 时,其队列长度低

于其它两种对比算法,这是因为所提 CRAMIMQ 能够依据传输链路的 QoS 值,动态地将用户数据包从 VLC 缓冲队列疏导到 WiFi 缓冲队列满足质量管控范围的子信道中,能充分利用 WiFi 传输链路的无小干扰优势,降低了 WiFi 缓冲队列长度;而对比的 QoS-CLDRA、IPFADC 算法与 SAIA 算法仅考虑为用户选择低时延的传输链路,降低了时延的 WiFi 传输链路利用率,且系统没有考虑 QoS 质量管控范围,导致时延的 WiFi 的链路被调度概率地,使 WiFi 缓冲队列长度较长,故 ω 增加时,两种对比算法的 WiFi 缓冲队列长度均高于本文所提 CRAMIMQ。与图 6 相比,在相同 ω 时, WiFi 缓冲队列长度明显低于 VLC 缓冲队列长度,这是因为:在室内 VLC-WiFi 异构网络中,为了避免 WiFi 缓冲队列过度拥塞,系统的控制中心为用户数据包优先开辟 VLC 传输链路,使 WiFi 链路的队列相对 VLC 链路更短一些。

图 8 为本文所提 CRAMIMQ、对比算法 QoS-CLDRA、SAIA 与 IPFADC 在 $|U|=16$ 时,系统吞吐量性能随缓存时延偏好因子的变化情况,平均数据包到达率 $\lambda=24$ 包每毫秒。当 ω 增加时,缓存时延性在式 (19) 所示的传输链路 QoS 级别评估中的权重增加,在同性能的链路中,用户数据包在侧重选择传输性能较好的链路同时,兼顾选择缓存时延性能较好的传输链路,使系统吞吐量快速增加。但是,随着 ω 继续增加,传输链路选择对缓存时延性能好的链路越来越偏重,新到达的用户数据包会着重选择缓存时延性能较好的传输链路,将错过一些传输性能好但缓存时延次之的传输链路,使系统的吞吐量开始下降。在不同的 ω 值情况下,相比其他 3 种算法,本文所提 CRAMIMQ 获得最高的吞吐量,这是因为 CRAMIMQ 评定了用户数据包 QoS 需求级别和对传输链路的 QoS 质量管控范围,改进了 QoS-CLDRA 算法缺少链路质量管控范围和数据包 QoS 级别粗糙的评定方法,并改进了 QoS-CLDRA 算法在链路 QoS 评估中缺少对缓存时延和带宽约束和整形的方法,使本文所提 CRAMIMQ 能选择处于 QoS 质量管控范围内且链路 QoS 评估更准确的传输链路,增加了数据包选择传输性能更好链路的概率,使系统内的跨层资源分配更加合理。当 $\omega=0.45$ 时,各算法的吞吐量接近最大值。

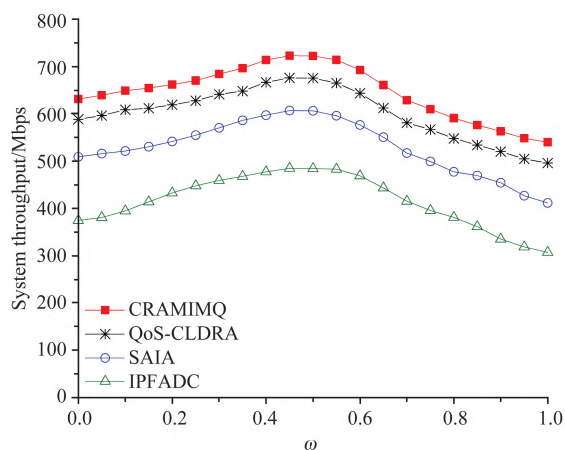


图 8 系统吞吐量与缓存时延偏好因子关系

Fig. 8 System throughput vs. buffer delay preference factor

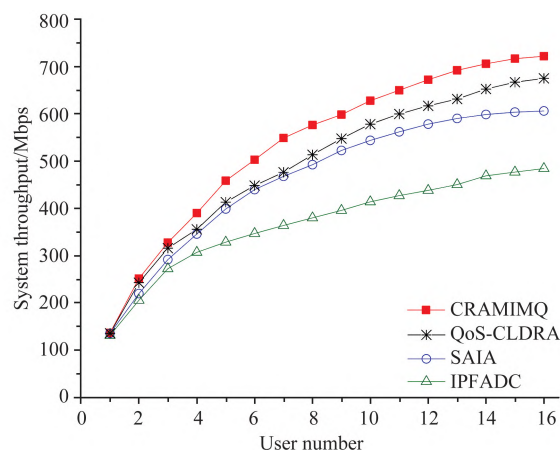


图 9 系统吞吐量与用户数目关系

Fig. 9 System throughput vs. number of users

图 9 为 CRAMIMQ、QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法的系统吞吐量在 $\omega=0.45$ 、 $\lambda=24$ 包每毫秒时随用户数目的变化情况。当用户数目增加时,所有方法的系统吞吐量都在逐渐增加,当用户数目继续增加时,系统吞吐量增加的速率趋于缓慢。原因是:用户增加时,对系统提供资源的需求也增加,而系统的资源有限,使越来越多用户因为缺少传输链路而被阻塞,故吞吐量的增加趋于平缓;但是,在确定用户数目时,相较于对比算法,本文所提 CRAMIMQ 的系统吞吐量最大,当用户数目为 16 时,相比 QoS-CLDRA、SAIA 和 IPFADC 算法,所提 CRAMIMQ 的系统吞吐量分别提高 5.64%、16.04% 和 32.92%。这是因为:本文所提 CRAMIMQ 为用户数据包评定 QoS 需求级别和设置传输链路的质量管控范围,在尽可能减轻小干扰的情况下,根据不同的决策规则,为用户数据包开辟出了不同标签类型的传输链路和子信道调整策略,以保证系统最大限度地利用系统的传输链路资源,提高系统吞吐量。

4 结 论

为了提高室内 VLC-WiFi 异构网络的系统吞吐量和满足用户差异化 QoS 传输需求,本文研究了基于干扰管理和 QoS 驱动的跨层资源分配算法,该算法通过评估用户的 QoS 需求级别,设计满足数据包传输要求的信道质量管控方法和提出多准则信道开辟与子信道调整策略,使数据包通过信道质量和时延都有保证的链路传输。当 $|U|=16$ 、 $\lambda=24$ 包每毫秒、 $S=1$ 千字节每包和 $\omega=0.45$ 时,相比其他对比算法,其系统吞吐量达到最大,值为 721.8 Mbps。随着室内 5G 应用和 6G 业务发展,CRAMIMQ 能保证数据传输性能和提高系统的资源利用率,对提高室内用户通信体验效果和系统性能都具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] LOPES C H D, ANDRADE T P V, SODRE A C. Implementation of a hybrid FiWi system using FSO, VLC and mm-waves toward 6G applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(24): 1403-1406.
- [2] ABUMARSHOUD H, MOHJAZI L, OCTAVIA A D, et al. Lifi through reconfigurable intelligent surfaces: a new frontier for 6G? [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2022, 17(1): 37-46.
- [3] BESJEDICA T, FERTALJ K, ZAKARIJA I. Evolution of hybrid LiFi-WiFi networks: a survey[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4252.
- [4] SODERI S, DE R N. 6G networks physical layer security using RGB visible light communications[J]. IEEE Access, 2022, 10: 5482-5496.
- [5] 陈勇, 张薇薇, 刘焕淋, 等. 室内 VLC-WiFi 异构网络中多色载波资源分配方法[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2024, 37(5): 48-59.
- [6] XIONG J, ZHANG R X, LU L, et al. Physical-layer network coding enhanced visible light communications using RGB LEDs[J]. IEEE Photonics Journal, 2023, 15(1): 7301010.
- [7] WU X P, SOLTANI M D, ZHOU L, et al. Hybrid LiFi and WiFi networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 1398-1420.
- [8] ABOAGYE S, NGATCHED T M N, DOBRE O A, et al. Joint access point assignment and power allocation in multi-tier hybrid RF/VLC hetNets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6329-6342.
- [9] NARMANLIOGLU O, UYSAL M. Event-triggered adaptive handover for centralized hybrid VLC/MMW networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(1): 455-468.
- [10] BORAH J, BORA J. Dynamic and location-based power allocation mechanism for inter-cell interference mitigation in 5G heterogeneous cellular network[J]. International Journal of Communication Systems, 2020, 33(15): 1-13.
- [11] DEMIR M S, UYSAL M. A cross-layer design for dynamic resource management of VLC networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(3): 1858-1867.
- [12] 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.
- [13] MOOSAVI N, SINAIE M, AZMI P, et al. Cross layer resource allocation in H-CRAN with spectrum and energy cooperation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(1): 145-158.
- [14] WU X, BRIEN D C O. QoS-driven load balancing in hybrid LiFi and WiFi networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(4): 2136-2146.
- [15] 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(07): 1665-1669.
- [16] WANG F, YANG F, PAN C, et al. Joint illumination and communication optimization in indoor VLC for IoT applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(21): 20788-20800.
- [17] CIFTLER B S, ALWARAFY A, ABDALLAH M. Distributed DRL-based downlink power allocation for hybrid RF/VLC networks[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-10.
- [18] ZHAI C X, LIU H, WEN Y Y, et al. Multipopulation genetic algorithm-optimized LED layout in a visible light communication system [J]. Optical Engineering, 2020, 59(6): 1-17.
- [19] LIU H L, LIN Z Y, CHEN Y, et al. Elite user clustering-based indoor heterogeneous VLC interference management and sub-channel allocation strategy[J]. IEEE Access, 2020, 8: 43582-43591.
- [20] AHMAD R, SOLTANI M D, SAFARI M, et al. Reinforcement learning-based near-optimal load balancing for heterogeneous LiFi WiFi network[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 3084-3095.
- [21] WANG X Q, GAN C Q, CHEN Y X. Rate-stabilized and load-balanced handover management for subway hybrid LiFi and WiFi networks [J]. Optics Communications, 2023, 549: 12890.

(下转第 33 页)

- [9] MENG Q, WANG H, LIU C, et al. High-speed and high-responsivity InP-based uni-traveling-carrier photodiodes[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2017, 5(1): 40-44.
- [10] CHEN Q, HUANG Y, ZHANG X, et al. Uni-traveling-carrier photodetector with high-reflectivity DBR mirrors[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(14): 1203-1206.
- [11] 王绍宇. 高速光探测器电极模型优化设计及其传输性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- [12] LIU T, HUANG Y, FEI J, et al. Influences of contact electrode shape and incidence direction on p-i-n photodiodes[J]. IET Optoelectronics, 2019, 13(4): 151-154.
- [13] 焦泓玮, 黄永清, 赵康, 等. 叉状光电探测器阵列电极的设计与优化[J]. 光子学报, 2019, 48 (11): 175-181.
- [14] MATTHEWM R. Radio Frequency and Microwave Electronics Illustrated[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2001.
- [15] ERIC B. Signal Integrity-Simplified[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2003.
- [16] 赵康. 光纤通信中高速大功率光探测器阵列的电极模型设计及传输性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [17] 焦泓玮. 光通信中高速光探测器的电极传输线设计及其性能的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [18] KATO K. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors[J], IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1999, 47(7): 1265-1281.
- [19] BELING A. Periodic travelling wave photodetectors with serial and parallel optical feed based on InP[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2006.
- [20] NAGATSUMA T, ITO H, ISHIBASHI T. High-power RF photodiodes and their applications[J]. Laser and Photonics Reviews, 2009, 3(1-2): 123-137.
- [21] 刘宇, 林志诚, 王鹏飞, 等. 超宽带光电探测器研究进展[J]. 红外与毫米波学报, 2023, 42(2): 169-187.
- [22] 吴培培, 付永启, 杨俊. 基于表面等离子激元的石墨烯光电探测器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700002.
- [23] HAN Y R, XIONG B, LUO Y, et al. Distributed parameter circuit model for wideband photodiodes with inductive coplanar waveguide electrodes[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(6): 061301.
- [24] WANG S Y, HUANG Y Q, REN X M. Research on the groove structure of InP-based photodetector electrode[C]. // 20th International Conference on Optical Communications and Networks, August, 2022, Shenzhen, ICOCN, 2022.
- [25] LI Q, LI K, FU Y, et al. High-power flip-chip bonded photodiode with 110 GHz bandwidth[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(9): 2139-2144.
- [26] 李明洋. HFSS 电磁仿真设计应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.
- [27] 田建柏, 熊兵, 王健, 等. 应用于 40 GB/s 电吸收调制器的 Al₂O₃ 高速热沉研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006(2): 105-108.
- [28] 付佳辉, 吴群, 顾学迈. 微机械传输线的毫米波应用[J]. 电子器件, 2003, 26(2): 6-15.
- [29] NIU H, HUANG Y, Yang Y, et al. High bandwidth-efficiency product MPIN photodiode with parallel-connected microstructure[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(5): 1-5.
- [30] 牛慧娟. 基于光场调控和微结构的高性能光探测器的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 13 页)

- [22] AHMAD R, SRIVASTAVA A. Sequential load balancing for link aggregation enabled heterogeneous LiFi WiFi network[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2022, 3: 138-148.
- [23] 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.
- [24] ZHANG H, LIU H X, CHEN P, 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.
- [25] SEKHAR K R, MIRAMIRKHANI F, MITRA R, et al. Generic BER analysis of VLC channels impaired by 3D user-mobility and imperfect CSI[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(7): 2319-2323.
- [26] WANG Y, CHEN W, POOR H V. Ultra-reliable and low-latency wireless communications in the high SNR regime: a cross-layer tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(1): 149-162.
- [27] ZHAN N, GAN C, HUI J, et al. Fair resource allocation based on user satisfaction in multi-OLT virtual passive optical network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 134707-134715.
- [28] XU Z, GAN C, WU L, et al. Self-adaptive resource-allocation scheme combining traffic prediction with user satisfaction in multi-wavelength VPON[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1-12.
- [29] CHATTERJEE S, SABUI D, KHAN G S, et al. Signal to interference plus noise ratio improvement of a multi-cell indoor visible light communication system through optimal parameter selection complying lighting constraints[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2021, 32 (10): 4291.

(责任编辑:赵海军)