

QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法

孙洪亮¹, 陈同飞¹, 钱磊²

(1. 吉林化工学院 信息与控制工程学院, 吉林 吉林 132022; 2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 为了高效保障可见光通信/射频(VLC/RF)异构网络的服务质量(QoS), 同时保障用户体验质量(QoE), 提出了一种 QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法。首先, 根据用户位置和 VLC 链路遮挡情况分析用户成功接入概率, 建立了切换服务模型并求解了服务过程的有效容量。采用中断均匀过程(IUP)来描述流量到达, 并计算了 IUP 到达的有效带宽。然后, 推导了满足时延 QoS 要求的 RF 服务速率, 并基于 QoS 与 QoE 的映射关系, 建立 QoE 评估体系。最后, 仿真分析了不同参数对资源分配算法的影响。仿真结果表明, 算法能够在保障 QoS 的同时保障 QoE。

关键词: 异构网络; 有效带宽; 有效容量; 服务质量; 体验质量; 资源分配

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)06-0016-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Resource allocation algorithm driven by
QoS-QoE for VLC/RF heterogeneous networksSUN Hongliang¹, CHEN Tongfei¹, QIAN Lei²

(1. College of Information and Control Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin Jilin 132022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To efficiently ensure the quality of service(QoS) and quality of experience(QoE) of visible light communication/radio frequency (VLC/RF) heterogeneous networks, a QoS-QoE driven resource allocation algorithm for VLC/RF heterogeneous networks is proposed. First, the success access probability of users is analyzed based on their locations and the blocking situation of VLC links, and a switching service model is established to solve the effective capacity of the service process. The interruption uniform process (IUP) is used to describe the arrival of traffic, and the effective bandwidth of the IUP arrival is calculated. Then, the RF service rate that satisfies the delay QoS requirement is derived, and the QoE evaluation system is established based on the mapping relationship between QoS and QoE. Finally, the influence of different parameters on the resource allocation algorithm is analyzed through simulation. The simulation results show that the algorithm can ensure QoS and QoE at the same time.

Key words: heterogeneous networks, effective bandwidth, effective capacity, quality of service, quality of experience, resource allocation

0 引言

在无线网络中, 可见光通信(VLC)技术因其

收稿日期: 2024-03-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 62301359)资助; 吉林省教育厅科学研究项目(批准号: JJKH20220243KJ)资助。

作者简介: 孙洪亮(1986—), 男, 吉林九台人, 副教授, 硕士生导师, 2019 年获吉林大学通信与信息系统专业博士学位。现任职于吉林化工学院信息与控制工程学院, 主要研究方向包括通信网络服务质量评估与保障、鞅理论在通信系统中的应用。



高速率、低干扰和高安全性而受到广泛关注^[1], 但 VLC 存在着传播距离受限和易受遮挡的问题^[2]。将射频(RF)通信作为 VLC 的补充, 构建 VLC/RF 异构网络, 可以克服 VLC 通信的局限性, 实现信号广域覆盖和稳定的通信连接^[3-4]。在 VLC/RF 异构网络中, 如何在保证服务质量(QoS)的前提下对系统资源进行合理预留和分配, 是一个影响网络服务效率的关键问题。

为解决 VLC/RF 异构网络的资源分配问题, 文献[5]针对用户数据包的 QoS 需求, 提出了室内 VLC/无线保真(WiFi)异构网络的 QoS 意识跨层动态资源分配方

法。该方法能够感知传输链路的 QoS,并依据 QoS 意识级别调整系统的资源分配,有效提升了系统吞吐量并降低了缓冲队列长度。文献[6]研究了 VLC/RF 网络的联合资源分配算法,该算法有效地实现了比例公平的最大化并提高了数据传输速率。一些学者在 VLC/RF 网络分析中引入了有效带宽和有效容量,为网络的性能优化和资源分配提供了可行思路^[7-10]。文献[11]考虑室内环境下 RF 和 VLC 链路进行数据传输的多机制场景,基于有效带宽和有效容量理论提出了一种链路选择策略,使发送端可以在满足 QoS 要求的链路上发送数据。受有效容量概念的启发,文献[12]应用 α -比例公平原则制定并求解室内 VLC 和 RF 系统移动终端(MT)的资源分配问题,仿真比较了多宿主 MTs 和多模式 MTs 的性能,结果显示多宿主 MTs 表现更优。文献[13]研究了窃听者存在时混合 VLC/RF 系统的有效容量和最大平均到达速率,并提出了一种按一定比例分配的多路复用方案,该方案能够提高缓冲区 QoS 约束和保密要求方面的性能。

然而,在 VLC/RF 异构网络资源分配问题中仅考虑 QoS 因素是不够全面的。随着通信技术的不断演进和用户需求的持续提升,网络用户对通信服务的期望正在经历从关注 QoS 到重视体验的显著变化。与 QoS 关注的方向不同,用户体验质量(QoE)更加全面地反映了用户在实际应用中的满意度。在 VLC/RF 网络中考虑 QoE,可以更准确地把握用户对通信服务的真实需求和期望。文献[14]针对室内 VLC 异构网络,提出了一种以用户 QoE 为导向的网络选择方法,利用效益成本比(BCR)指标对备选方案进行排序,来选择最佳接入网络。另外,文献[15]提出了一种以用户 QoE 为优化目标的异构网络动态接入算法,该算法能显著降低网络切换次数,使用户 QoE 得到提升。文献[16]提出了一种基于 QoE 的 VLC/WiFi 异构网络协同水平垂直切换(VHO)策略,通过协调水平和垂直切换来提高用户的平均 QoE。

若在资源分配中综合考虑 QoS 和 QoE 因素,则有助于提升用户满意度、提高系统利用率。因此,本文针对室内 VLC/RF 异构网络,提出一种基于 QoS-QoE 驱动的资源分配算法。

1 系统建模分析

1.1 VLC/RF 服务建模及分析

本文主要针对室内 VLC/RF 网络通信场景展开研究。假设室内存在 2 个 VLC 接入点(AP)、1 个 RF AP、

1 个控制中心以及多个用户设备(UE),研究模型如图 1 所示。在该模型中,VLC₁ 和 VLC₂ 分别表示室内的 2 个 VLC AP, R 表示 VLC AP 的信号覆盖半径, L 表示 2 个 VLC AP 信号覆盖区域圆心之间的距离 ($R \leq L \leq 2R$), φ 表示相邻 VLC AP 覆盖范围的交点到覆盖区域圆心的连线与 L 之间的夹角。

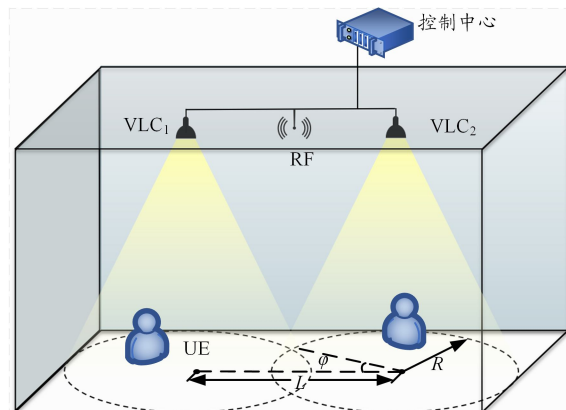


图 1 室内 VLC/RF 异构网络模型图

将覆盖率定义为不同 AP 信号覆盖面积占室内总面积的概率。VLC AP 区域的覆盖率 C_{VLC} 可以表示为

$$C_{\text{VLC}} = \frac{A_{\text{VLC}}}{A_{\text{rea}}} = \frac{\pi R^2}{4R^2 + 2RL} \quad (1)$$

其中, A_{rea} 表示室内区域的总面积, A_{VLC} 表示 VLC₁ 和 VLC₂ 的信号覆盖区域面积。

VLC AP 重叠区域的覆盖率 C_{ICI} 可以表示为

$$C_{\text{ICI}} = \frac{A_{\text{ICI}}}{A_{\text{rea}}} = \frac{2\arccos\left(\frac{L}{2R}\right)R^2 - L\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}}{4R^2 + 2RL} \quad (2)$$

其中, A_{ICI} 表示 VLC AP 重叠区域的面积。

考虑室内不同区域对 VLC 信号的接收能力,同时根据 VLC AP 的信号覆盖范围和环境中可能存在的遮挡因素,用户接入不同 AP 的概率可以表示为

$$\begin{cases} P_{\text{VLC}_1} = (C_{\text{VLC}_1} - C_{\text{ICI}})(1 - \beta_1) + C_{\text{ICI}}(1 - \beta_1)\beta_2 \\ P_{\text{VLC}_2} = (C_{\text{VLC}_2} - C_{\text{ICI}})(1 - \beta_2) + C_{\text{ICI}}(1 - \beta_2)\beta_1 \\ P_{\text{RF}} = (C_{\text{VLC}_1} - C_{\text{ICI}})\beta_1 + (C_{\text{VLC}_2} - C_{\text{ICI}})\beta_2 + C_{\text{ICI}}\beta_1\beta_2 + \\ C_{\text{ICI}}(1 - \beta_1)(1 - \beta_2) + (1 - C_{\text{VLC}_1} - C_{\text{VLC}_2} + C_{\text{ICI}}) \end{cases} \quad (3)$$

其中, β_1 、 β_2 分别表示 VLC₁、VLC₂ 的遮挡概率。

当用户接入 VLC₁、VLC₂ 和 RF 时,系统为用户提供的服务速率分别为 R_{VLC_1} 、 R_{VLC_2} 和 R_{RF} ,本文将 VLC/RF 网络的第 t 个时隙的瞬时服务 $s(t)$ 描述为

$$s(t) = \begin{cases} R_{\text{VLC}_1}, \text{ s.t. } P_{\text{VLC}_1} \\ R_{\text{VLC}_2}, \text{ s.t. } P_{\text{VLC}_2} \\ R_{\text{RF}}, \text{ s.t. } P_{\text{RF}} \end{cases} \quad (4)$$

孙洪亮,陈同飞,钱磊: QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法

接下来,计算服务过程的有效容量。服务过程的 Gartner-Ellis (GE) 极限表达形式如下:

$$\Lambda_c(-\theta) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(E(e^{-\theta S(t)})) \quad (5)$$

其中, $E(\cdot)$ 为期望, $S(t)$ 为累计服务; $\theta (\theta > 0)$ 表示 QoS 违反概率呈指数下降的速度, 称为 QoS 指数。

文献[10]指出, 有效容量 $V_c(\theta)$ 可表示为服务过程的广义渐近 (GE) 极限和 QoS 指数 θ 的函数, 再根据服务过程及有效容量计算方法, 可以得出 $V_c(\theta)$ 的表达式为

$$V_c(\theta) = -\frac{1}{\theta} \log(P_{VLC_1} e^{-\theta R_{VLC_1}} + P_{VLC_2} e^{-\theta R_{VLC_2}} + P_{RF} e^{-\theta R_{RF}}) \quad (6)$$

1.2 流量建模分析

本文引入中断均匀过程 (IUP) 对具有突发性的流量到达进行建模, IUP 到达时的马尔科夫链如图 2 所示。IUP 由一个活动 (ON) 状态和一个非活动 (OFF) 状态组成。如果系统处于 ON 状态, 则下一个时隙转移到 OFF 状态的概率为 q , 保持在 ON 状态的概率为 $1-q$ 。如果系统处于 OFF 状态, 则下一个时隙转移到 ON 状态的概率为 p , 保持在 OFF 状态的概率为 $1-p$ 。ON 状态下, 数据包的到达遵循均匀分布 $U[a, b]$, 其中, a, b 为 IUP 模型包到达速率, 且 $0 < a \leq b$ 。OFF 状态下没有数据包到达。

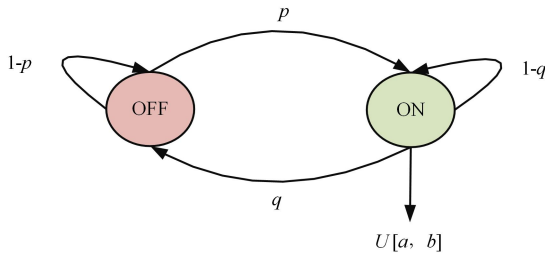


图 2 IUP 到达时的马尔科夫链模型图

ON 状态的稳态概率为

$$P(\text{ON}) = \frac{p}{p+q} \quad (7)$$

对于均匀分布 $U[a, b]$, 其平均到达速率 λ 可通过式 (9) 计算得到

$$\lambda = \frac{a+b}{2} \quad (8)$$

在缓冲区, IUP 到达的平均到达强度 μ 可以表示为

$$\mu = \lambda P(\text{ON}) = \frac{p(a+b)}{2(p+q)} \quad (9)$$

有效带宽可以表示为到达过程的 GE 极限和 QoS 指数 θ 的函数, 根据到达过程及马尔科夫链模型[17], 可

以得出 IUP 的有效带宽表达式为

$$V_B(\theta) = \frac{1}{\theta} \log\left(\frac{X_1 + \sqrt{X_2 + X_3}}{2}\right) \quad (10)$$

其中, $X_1 = \frac{(1-p) + (1-q)(e^{a\theta} + e^{(a+1)\theta} + e^{(a+2)\theta} + \dots + e^{b\theta})}{b-a+1}$,

$$X_2 = \left[(1-p) - (1-q) \left(\frac{e^{a\theta} + e^{(a+1)\theta} + e^{(a+2)\theta} + \dots + e^{b\theta}}{b-a+1} \right) \right]^2,$$

$$X_3 = 4pq \left(\frac{e^{a\theta} + e^{(a+1)\theta} + e^{(a+2)\theta} + \dots + e^{b\theta}}{b-a+1} \right)。$$

2 QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法

2.1 QoS 约束下的服务需求

为满足室内 VLC/RF 网络中的 QoS 约束, 到达过程的有效带宽与服务过程的有效容量需满足式 (11)。

$$V_B(\theta) \leq V_c(\theta) \quad (11)$$

为了有效地利用带宽资源, 当式 (11) 取等式关系时, 可以得到保证时延 QoS 约束的最小 RF 服务速率, 具体如下:

$$R_{RF} = -\frac{1}{\theta} \log\left(\frac{e^{-\theta V_B(\theta)} - P_{VLC_1} e^{-\theta R_{VLC_1}} - P_{VLC_2} e^{-\theta R_{VLC_2}}}{P_{RF}}\right) \quad (12)$$

QoS 指数 θ 的取值可以通过式 (13) 确定。

$$\theta = \frac{-\log \varepsilon}{\mu D} \quad (13)$$

其中, D 表示目标时延, ε 表示时延违反概率阈值。

2.2 QoS-QoE 映射关系

为了评估用户的 QoE, 本文考虑 3 个关键影响因素[18]: 系统因素 (SIFs)、环境因素 (CIFs) 和人为因素 (HIFs)。参考文献[19-20], 将 QoE 的评估结果表示为

$$F(\text{QoE}) = f(Q_{\text{SIFs}}, Q_{\text{CIFs}}, Q_{\text{HIFs}}) \quad (14)$$

其中, $f(\cdot)$ 是映射函数, Q_{SIFs} 主要关注网络的稳定性、覆盖率和传输速率等基础性能指标, Q_{CIFs} 则关注用户所处的具体环境因素, Q_{HIFs} 涉及到用户个人喜好、使用习惯等主观因素。

为了更准确地评估用户的 QoE 并量化资源, 本文采用广泛使用的平均意见得分 (MOS) 作为评估指标[21]。MOS 是一种常用的主观评价方法, 能够量化用户对语音、视频等多媒体应用的质量感受, 一般取值为 1~5, 其中, 5、4、3、2、1 分别代表满意度中的优、良、中、差、极差 5 个等级。

设 Q_{SIFs} 、 Q_{CIFs} 和 Q_{HIFs} 符合 MOS 评级标准, 本文综合考虑 Q_{SIFs} 、 Q_{CIFs} 和 Q_{HIFs} 这 3 个因素, 同时分别设置权

重,构造 QoE 评估模型如式(15)所示。

$$M_Q = \alpha M_S + \beta M_C + \gamma M_H \quad (15)$$

其中, M_S 、 M_C 、 M_H 分别表示 Q_{SIFs} 、 Q_{CIFs} 和 Q_{HIFs} 对应的 MOS 值。同时, α 、 β 和 γ 是权重因子,分别表示 Q_{SIFs} 、 Q_{CIFs} 和 Q_{HIFs} 在 QoE 评估中的重要程度。其中, M_S 可由式(16)^[22-25]计算得到。

$$M_S = \sigma \log(\omega \theta) + \tau \quad (16)$$

其中, σ 、 ω 、 τ 均为 QoE 评估模型的参数。

2.3 资源分配算法

本文的主要目标是通过调整 Q_{SIFs} 中的参数来改变 QoE 的 MOS 值。在 ε 给定的情况下, M_S 主要受 D 的影响。

根据式(12)和式(16), Q_{SIFs} 的 MOS 值 M_S 与 RF 服务之间的关系可以表示为

$$R_{RF}(M_S) = -\frac{\omega}{e^{\frac{M_S - \tau}{\sigma}}} \log \left(\frac{e^{-\frac{M_S - \tau}{\sigma}} e^{V_b(\theta)} - P_{VLC_1} e^{-\frac{M_S - \tau}{\sigma}} R_{VLC_1} - P_{VLC_2} e^{-\frac{M_S - \tau}{\sigma}}}{P_{RF}} \right) \quad (17)$$

为了满足 QoS 要求并保障 QoE, 本文提出了一种 QoS-QoE 驱动的资源分配算法,详细流程如算法 1 所示。

算法 1 QoS-QoE 驱动的资源分配算法

输入: 用户期望 M_{exp} , Q_{SIFs} 得分 M_S , Q_{HIFs} 得分 M_H

输出: RF 服务速率 R_{RF} , 系统的 QoE M_Q

- 1) 获取期望的 QoE
- 2) 将 M_Q 的值设置为 M_{exp}
- 3) 通过式(16)计算 M_S
- 4) if ($1 \leq M_S \leq 5$)
- 5) 根据式(17)计算 R_{RF} 的值并输出
- 6) 输出支持的 QoE
- 7) else
- 8) 系统所能支持的最大 M_S
- 9) 通过式(15)计算 M_Q
- 10) 转至 5)
- 11) end if

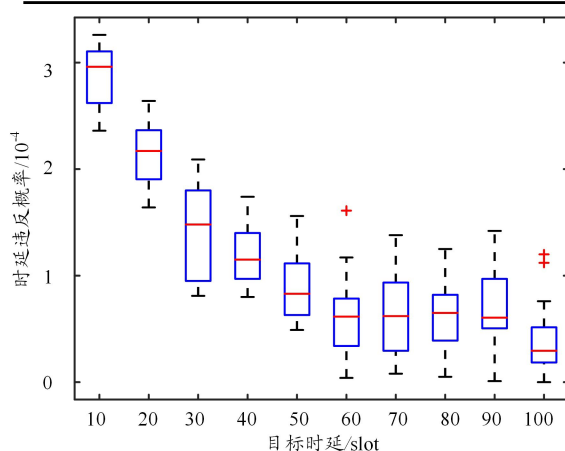
3 仿真分析

为了验证所提算法的稳定性, 本文进行了 QoS 和 QoE 评估实验。在实验中, 随机生成了服从 IUP 分布的流量, 并将其作为输入流量进行测试。在无特殊说明的情况下, 本文仿真参数将按照表 1 中的设定进行取值。

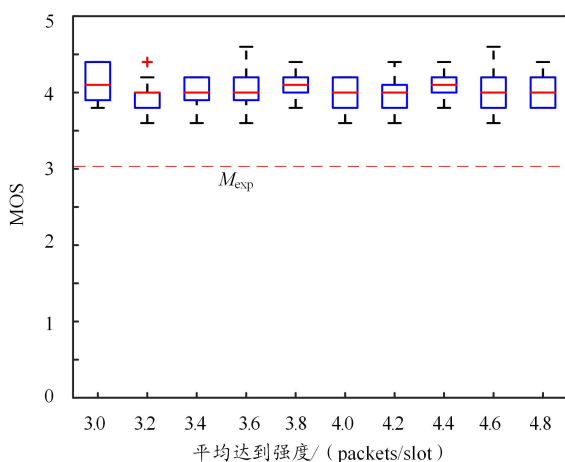
首先, 为了评估时延违反概率和用户 QoE 值, 本文进行了相关实验并记录了实验的结果, 如图 3 所示。图中箱体的上边和下边分别对应于数据的最大值

表 1 仿真实验参数表

参数	取值
VLC AP 之间的距离 l/m	3
VLC AP 覆盖半径 r/m	2
VLC ₁ 遮挡因子 β_1	0.4
VLC ₂ 遮挡因子 β_2	0.6
IUP 模型状态转移概率 p	0.6
IUP 模型状态转移概率 q	0.4
IUP 模型包到达速率 $a/(\text{packets/slot})$	4
IUP 模型包到达速率 $b/(\text{packets/slot})$	6
时延违反概率的阈值 ε	10^{-3}



(a) 时延违反概率实验箱图



(b) QoE 实验箱图

图 3 QoS-QoE 验证结果图

和最小值。箱内的中线则表示数据的中位数,即所有数据中最中间的值。箱体的内部区域则包含了大部分数据的范围。此外,符号“+”代表离群值。从图 3(a)可以看出,在不同的目标时延下,时延违反概率都小于离群值,即指定的阈值 ε 。这表明 RF 匹配的服务速率

孙洪亮,陈同飞,钱磊: QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法

能够满足系统的统计时延 QoS 要求。从图 3(b)可以看出,在不同的平均到达强度下,通过资源分配算法获得的 MOS 始终超过预设的期望值 M_{exp} ,这表明算法可以满足用户的 QoE 要求。

目标时延和 VLC 服务速率对 RF 服务速率的影响如图 4 所示。可以看出,当 VLC 服务速率不变时,随着目标时延增大(要求越来越宽松),RF 的服务速率逐渐降低(这表明对于更宽松的时延要求,RF 只需提供更少的服务即可满足需求);当目标时延保持不变时,VLC 服务速率的增加会使 RF 服务速率降低。这是因为随着 VLC 服务速率的提高,服务能力也随之增强,从而能更有效地处理数据包。因此,只需要较少的 RF 服务就能满足时延 QoS 要求。

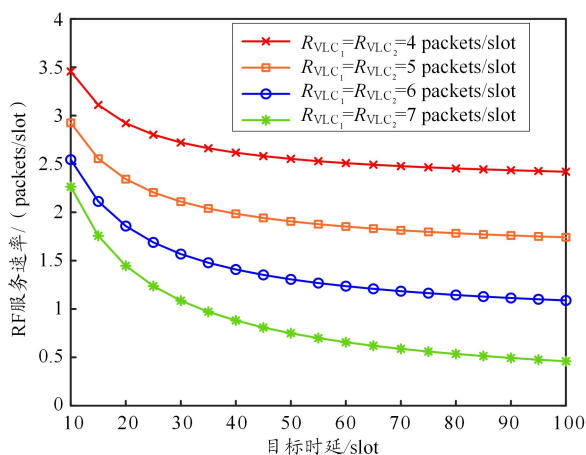


图 4 目标时延和 VLC 服务速率对 RF 服务速率的影响

QoE 与目标时延、时延违反概率阈值之间的关系如图 5 所示。可以看出,随着时延违反概率阈值和目标时延的降低,相应的 M_Q 值呈现上升趋势。越小的时延违反概率阈值和目标时延代表网络的 QoS 需求越高,用户的体验会随着时延违反概率阈值和目标时延

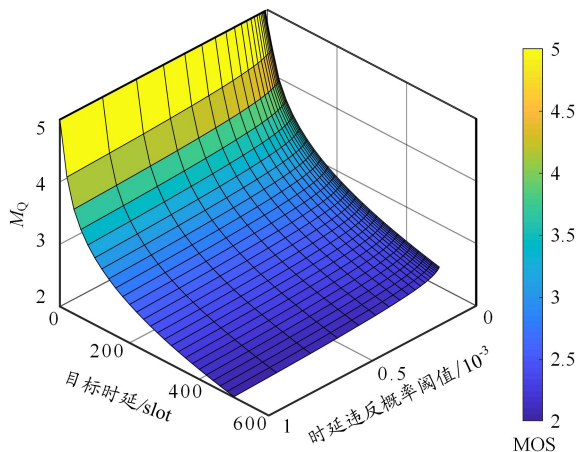


图 5 QoE 与目标时延、时延违反概率阈值的关系

的下降而升高。

QoE 与 Q_{SIFs} 、 Q_{HIFs} 和 Q_{CIFs} 之间的关系如图 6 所示。图中黄色区域代表 QoE 值较高,蓝色则表示 QoE 值较低。随着 Q_{SIFs} 、 Q_{HIFs} 和 Q_{CIFs} 这 3 个影响因素的 MOS 值 (M_S 、 M_C 、 M_H) 逐渐提高,用户的最终 QoE 也得到了相应的提高。表明 Q_{SIFs} 、 Q_{HIFs} 和 Q_{CIF} 都对用户的体验产生了不同程度的影响。因此,为了提高用户体验的质量,需要考虑 Q_{SIFs} 、 Q_{HIFs} 和 Q_{CIFs} 这 3 个因素,从而有效促进 QoE 的提高。

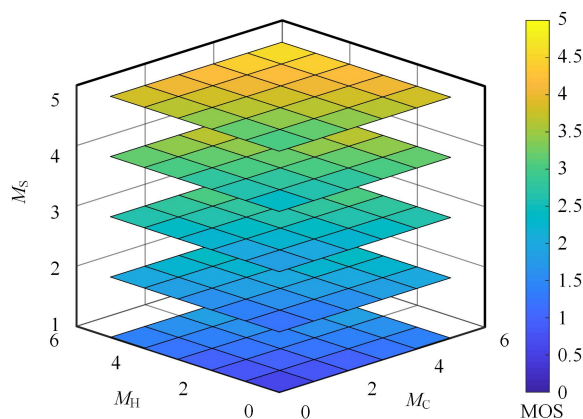


图 6 QoE 与 Q_{SIFs} 、 Q_{HIFs} 和 Q_{CIFs} 的关系

QoE 和 VLC 服务速率对 RF 服务速率的影响如图 7 所示。可以看出,在 VLC 服务速率保持一致的情况下,随着 QoE 要求的提高,RF 服务速率也会提高。因此,为了满足更高的体验质量要求,系统需要匹配更多的 RF 资源,从而实现更好的用户体验。另一方面,当 M_Q 值保持不变时,随着 VLC 服务速率的增加,RF 服务速率,即需要匹配 RF 服务的带宽会减少。当 VLC 能够提供更高的服务速率时,系统则只需要匹配较少的 RF 资源就可以保障 QoE。

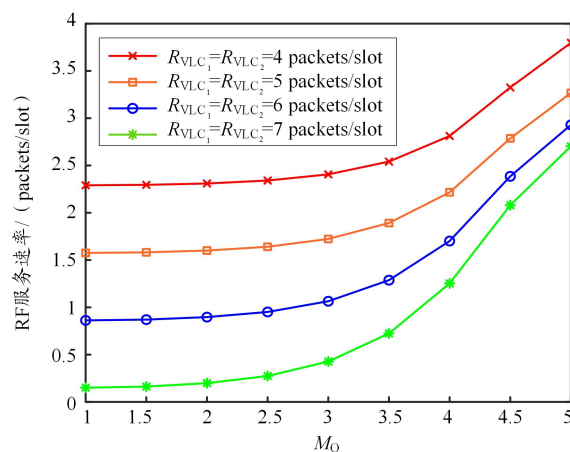
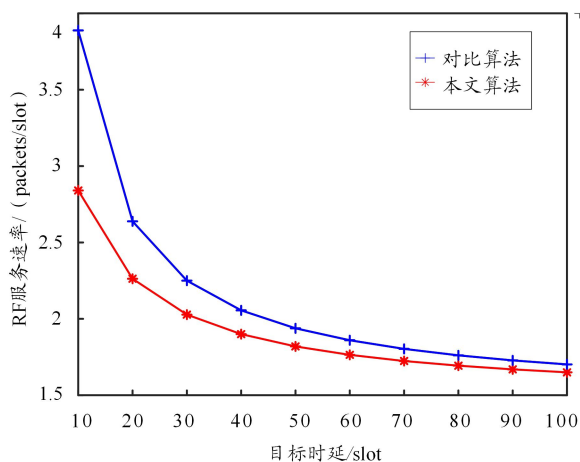
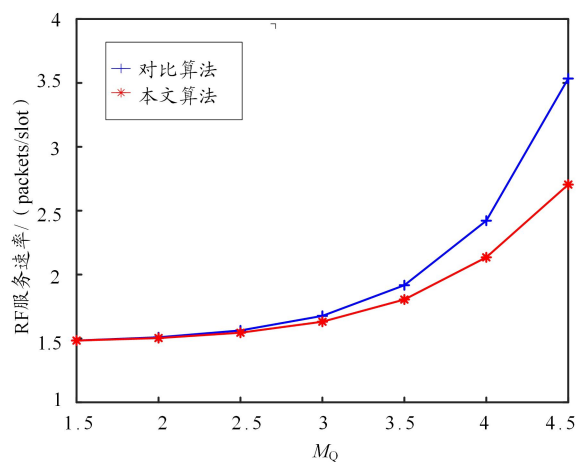


图 7 QoE 和 VLC 服务速率对 RF 服务速率的影响

最后,将本文所提出的算法与文献[26]中的资源分配算法进行了比较,结果如图 8 所示。文献[26]主要在 VLC/RF 网络场景中利用补偿机制实现了 QoS 保障。从图 8(a)可以看出,对于相同的目标时延,根据本文算法所计算的 RF 服务速率会低于对比算法的数值。从图 8(b)可以看出,在相同 M_Q 的前提下,本文算法求解的 RF 服务速率低于对比算法的数值。文献[26]中的资源分配算法不需要调度过程,简化了服务机制,本文所提出的算法虽然需要调度机制,但在保证 QoS-QoE 的前提下,能更有效地节省带宽资源。



(a) 目标时延对 RF 服务速率的影响



(b) QoE 对 RF 服务速率的影响

图 8 算法仿真对比图

4 结束语

本文提出了一种 QoS-QoE 驱动的资源分配算法。该算法考虑了用户位置与 VLC 通信中可能出现的遮挡情况,构建了 VLC/RF 网络切换服务模型,并求解服务的有效容量。同时,采用 IUP 描述流量的到达,推导出 IUP 到达的有效带宽,从而计算出满足统计时延

QoS 要求的服务速率。然后,根据 QoS 与 QoE 之间的映射关系,建立了综合考虑 SIFs、CIFs 和 HIFs 的 QoE 评估体系。最后,仿真分析不同 QoS、QoE 以及到达参数对算法的影响,结果证明资源分配算法在保障 QoS 的同时,能够有效保障用户 QoE。研究成果可以为异构网络资源分配提供一定的参考。

参考文献:

- [1] BURCHARDT H, SERAFIMOVSKI N, TSONEV D, et al. VLC: beyond point-to-point communication [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(7): 98–105.
- [2] LI X, ZHANG R, HANZO L. Cooperative load balancing in hybrid visible light communications and WiFi [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4): 1319–1329.
- [3] RAHAIM M B, VEGNI A M, LITTLE T D C. A hybrid radio frequency and broadcast visible light communication system [C]//2011 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 05–09, 2011, Houston, USA. New York: IEEE, 2011: 792–796.
- [4] CHOWDHURY H, KATZ M. Cooperative data download on the move in indoor hybrid (radio - optical) WLAN - VLC hotspot coverage [J]. Transactions on emerging telecommunications technologies, 2014, 25(6): 666–677.
- [5] 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.
- [6] PAPANIKOLAOU V K, DIAMANTOULAKIS P D, SOFOTASIOS P C, et al. On optimal resource allocation for hybrid VLC/RF networks with common backhaul [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(1): 352–365.
- [7] GIBBENS R J, HUNT P J. Effective bandwidths for the multi-type UAS channel [J]. Queueing Systems, 1991, 9: 17–27.
- [8] GUERIN R, AHMADI H, NAGHSHINEH M. Equivalent capacity and its application to bandwidth allocation in high-speed networks [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1991, 9(7): 968–981.
- [9] HUI J Y. Resource allocation for broadband networks [J]. IEEE Journal on selected areas in communications, 1988, 6(9): 1598–1608.
- [10] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service [J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2003, 2(4): 630–643.
- [11] 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.
- [12] JIN F, ZHANG R, HANZO L. Resource allocation under delay-guarantee constraints for heterogeneous visible-light and RF femtocell [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 14(2): 1020–1034.
- [13] DA SILVA I W G, OSORIO D P M, OLIVO E E B, et al. Secure hybrid RF/VLC under statistical queueing constraints [C]//2021 17th International Symposium on Wireless Communication Systems, September 06–09, 2021, Berlin, Germany. New York: IEEE, 2021: 1–6.
- [14] TANG T, SHANG T, LI Q, et al. Quality-of-experience-oriented network selection for indoor VLC heterogeneous networks [C]//2020 16th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking

孙洪亮,陈同飞,钱磊: QoS-QoE 驱动的 VLC/RF 异构网络资源分配算法

and Communications (WiMob), October 12–14, 2020, Thessaloniki, Greece. New York: IEEE, 2020: 111–116.

[15] 翟雷,倪菊,覃琦超,等. 基于 QoE 的室内 VLC-RF 异构网络动态接入算法[J]. 现代电子技术, 2021, 44(13): 17–22.

[16] WANG S, TANG Y, DU J. Research on handover strategy of heterogeneous networks based on user service quality[J]. International Journal of Communication Systems, 2022, 35(4): e5048-1–e5048-10.

[17] CHANG C S. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(5): 913–931.

[18] BARAKOVI H J, BARAKOVI S, CERO E, et al. Quality of experience for unified communications: a survey[J]. International Journal of Network Management, 2020, 30(3): e2083-1–e2083-25.

[19] BRUNNSTROM, K, BEKER S A, DE K, et al. Qualinet white paper on definitions of quality of experience [R/OL]. [2024-03-21]. https://www.qualinet.eu/wp-content/uploads/2021/04/QoE_whitepaper_v1.2.pdf.

[20] LAGHARI K U R, CONNELLY K. Toward total quality of experience: a QoE model in a communication ecosystem [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(4): 58–65.

[21] 林闯,胡杰,孔祥震. 用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 1–15.

[22] REICHL P, EGGER S, SCHATZ R, et al. The logarithmic nature of QoE and the role of the Weber-Fechner law in QoE assessment [C]//2010 IEEE International Conference on Communications, May 23–27, 2010, Cape Town, South Africa. New York: IEEE, 2010: 1–5.

[23] ZHANG X, WANG J. Joint heterogeneous statistical-QoS/QoE provisionings for edge-computing based WiFi offloading over 5G mobile wireless networks [C]//2018 52nd annual conference on information sciences and systems, March 21–23, 2018, Princeton, USA. New York: IEEE, 2018: 1–6.

[24] WANG J, CHENG W. Heterogeneous quality of experience guarantees over wireless networks[J]. China Communications, 2018, 15(10): 51–59.

[25] AROUSSI S, BOUABANA-TEBIBEL T, MELLOUK A. Empirical QoE/QoS correlation model based on multiple parameters for VoD flows[C]//2012 IEEE global communications conference (GLOBECOM). December 3–7, 2012, Anaheim, USA. New York: IEEE, 2012: 1963–1968.

[26] SUN H, WANG C, LIAO Z, et al. A supermartingale theory-based random compensation algorithm for visible light communication/radio frequency hybrid networks[J]. IEEE Access, 2023, 11: 82192–82198.