

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

一种用于优化 VLC/WiFi 异构网络资源的动态比例公平算法

杨立伟, 王志立, 赖文聪, 朱福荣
(中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了提高可见光通信(VLC)/WiFi 异构网络中的资源利用率, 提出了一种动态比例公平(PF)算法。该算法通过引入补偿因子 α 来优化用户的优先级。首先, 理论推导了 VLC/WiFi 异构网络的吞吐量、资源利用率和公平性指数等关键性能指标; 然后, 使用 Matlab 软件进行仿真, 构建了一个 VLC/WiFi 异构网络系统; 最后, 将动态 PF 算法、PF 算法以及最大载干比(Max C/I)算法在吞吐量、资源利用率、公平性以及访问延迟概率等方面的性能进行了对比。仿真结果表明: 动态 PF 算法的吞吐量高于 PF 算法, 并且远高于 Max C/I 算法; 这 3 种算法的资源利用率均较高, 均不低于 0.96; 动态 PF 算法的公平性指数约为 0.97, 优于其它 2 种算法, 并且访问延迟概率较低。

关键词: 可见光通信; 无线保真; 异构网络; 比例公平算法

中图分类号: TN929 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2023)05-0001-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic proportional fairness algorithm for optimizing VLC/WiFi heterogeneous network resources

YANG Liwei, WANG Zhili, LAI Wencong, ZHU Furong

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to improve resource utilization in visible light communication(VLC)/WiFi heterogeneous networks, a dynamic proportional fairness(PF) algorithm is proposed. The algorithm optimizes the user's priority by introducing a compensation factor α . Firstly, the key performance indexes of VLC/WiFi heterogeneous network such as throughput, resource utilization and fairness index are theoretically derived. Then, a VLC/WiFi heterogeneous network system is constructed by using Matlab software for simulation. Finally, the performance of dynamic PF algorithm, PF algorithm and Max C/I algorithm in terms of throughput, resource utilization, fairness and access delay probability is compared. The simulation results show that the throughput of dynamic PF algorithm is higher than that of PF algorithm and much higher than that of Max C/I algorithm. The resource utilization rate of these three algorithms is higher than 0.96. The fairness index of dynamic PF algorithm is about 0.97, which is better than the other two algorithms, and the probability of access delay is lower.

Key words: visible light communication, wireless fidelity, heterogeneous networks, proportional fairness algorithm

0 引言

近年来,异构网络系统在各种环境应用中都取得

了良好的效果^[1]。可见光通信(VLC)作为异构网络系统的重要解决方案之一,引起了广泛的关注^[2]。VLC 与 WiFi 之间无同频干扰,为 VLC/WiFi 异构网络系统的建立奠定了基础^[3]。在 VLC/WiFi 异构网络系统中,资源的优化分配管理非常重要,最常用的资源管理算法是比例公平(PF)算法,但这种算法在保证系统整体公平性的同时会存在单个用户的访问时延上限。因此,为了提高 VLC/WiFi 异构网络系统中的带宽资源利用率,本文提出一种动态 PF 算法。

1 系统模型

VLC/WiFi 异构网络系统可应用于医院、工厂、办

收稿日期: 2023-01-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 61705260)资助;中国农业大学 2115 人才培养计划项目资助。

作者简介: 杨立伟(1981—),女,河北唐山人,博士,副教授,中国农机学会标准化分会委员、中国农业大学智慧农村能源高水平创新团队成员。主要研究方向是光/无线网络研究,包括接入网、光/无线融合网络、可见光通信、农业物联网、电力线通信等。承担各类国家、省部级课题以及自然科学基金课题多项;发表文章百余篇,其中 SCI/EI 检索文章 70 余篇;申请发明专利 6 项,其中授权专利 3 项;完成行业标准及团体标准 10 余项。



杨立伟,王志立,赖文聪,等:一种用于优化 VLC/WiFi 异构网络资源的动态比例公平算法

公室等室内场所,其结构如图 1 所示。在室内环境中,一些用户仅被 WiFi 资源覆盖(A 区域),而另一些用户同时拥有 WiFi 资源和 VLC 资源(B 区域)。VLC 接入点信号资源由远端中心局(CO)进行调度,再由控制器进行分配。将 VLC 与 WiFi 合理分布,可以在室内实现无缝的无线网络覆盖^[4]。

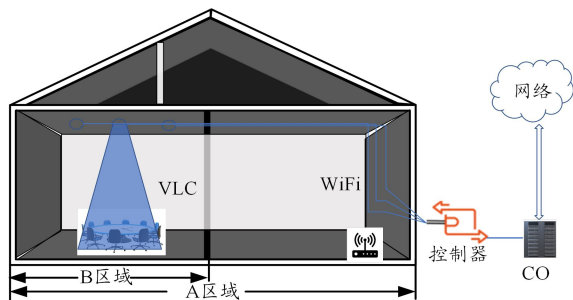


图 1 室内 VLC/WiFi 异构网络系统模型

2 动态 PF 算法

在 VLC/WiFi 异构网络系统中,最常用的资源管理算法是 PF 算法^[5]。PF 算法的一般流程如下:

- 1) 获取用户信道质量并计算用户在当前时间可能达到的速率。
- 2) 计算用户在每个资源块上的优先级。
- 3) 将资源分配给资源块上优先级最高的用户,按照优先级分配到数组 Schedule。
- 4) 判断资源列表是否为空,若判断为是,则继续运行;若判断为否,则运行结束。
- 5) 继续分配资源,判断 K (K 为数组 ScheduleQ 的个数) 是否为最大队列。

本文提出了一种改进的 PF 算法,即动态 PF 算法,该算法对上述用户优先级计算方法进行了改进。同时,引入了补偿因子 α 来对时延较大的用户进行补偿,以提高时延较大用户的优先级。传统的优先级计算公式如式(1)所示,改进后的优先级计算公式如式(2)所示。

$$P_i(t) = \frac{R_i(t)}{\bar{R}_i(t)} \quad (1)$$

$$\dot{P}_i(t) = \frac{R_i(t)}{\bar{R}_i(t)} \alpha \quad (2)$$

其中, $P_i(t)$ 是用户 i 在时间 t 处的优先级, $R_i(t)$ 是用户 i 在时间 t 内可以分配的速率, $\bar{R}_i(t)$ 是用户 i 在时间 t 之前的平均请求速率, $\dot{P}_i(t)$ 为改进后的优先级。 $\alpha = e^{-\frac{(N-n)^2}{N^2}}$, N 为用户数, n 为根据用户时延分配的优先级

$$\text{序列号, } m = \arg \max_{1 \leq i \leq N} \left(\frac{R_i(t)}{\bar{R}_i(t)} \right)。$$

当高优先级用户被频繁调度,其平均请求速率会增加,因此需要适当降低其优先级来为其它未调度用户分配资源。

在每个调度周期结束时,系统将进一步分配 $\bar{R}_i(t)$ 。如果上轮调用了用户 i ,则其分配结果如下:

$$\bar{R}_i(t) = (1 - \frac{1}{t_c}) \bar{R}_i(t-1) \quad (3)$$

其中, t_c 是每个时间段的长度, $\bar{R}_i(t-1)$ 是用户 i 在前一个时间段中的平均请求速率。

未调用用户 i 时,分配结果如下:

$$\bar{R}_i(t) = (1 - \frac{1}{t_c}) \bar{R}_i(t-1) - \frac{1}{t_c} R_i(t) \quad (4)$$

根据式(2)~式(4)可知,由于 $\bar{R}_i(t)$ 是变化的,因此, $\dot{P}_i(t)$ 值是动态的。

在 VLC/WiFi 异构网络系统中,由于 VLC 带宽宽、传输速率高,因此优先级较高的用户首先使用 VLC 资源。随着 VLC 用户增多,VLC 用户平均资源量降低,WiFi 资源的优先级随之增大,因此优先级低的用户会使用 WiFi 资源。异构网络系统中用户获取 VLC 资源、WiFi 资源的优先级分别为

$$P_{i,VLC}(t) = \dot{P}_i(t) \beta_i \quad (5)$$

$$P_{i,WiFi}(t) = \dot{P}_i(t) \gamma_i \quad (6)$$

其中, β_i 、 γ_i 分别为异构网络系统中 VLC、WiFi 资源调整因子。

本文根据图 1 仿真模拟建立室内 VLC/WiFi 异构网络系统。在 A 区域内,用户仅使用 WiFi 资源,B 区域内用户同时享受 WiFi 和 VLC 资源。

动态 PF 算法除了改进用户优先级计算方法外,还根据 A、B 区域资源优先级大小为用户分配资源,具体流程如下:

- 1) 在每一轮算法开始前计算用户平均请求速率和上一轮所有用户的时延,按照时延分配补偿因子。
- 2) 计算 A、B 区域用户的补偿优先级。
- 3) 若用户为 A 区域用户,则根据资源优先级分配 WiFi 资源。
- 4) 若用户为 B 区域 VLC 用户,则根据 VLC 资源优先级大小依次分配资源。
- 5) 若用户为 B 区域 WiFi 用户,则与 A 区域用户联合

分配,根据调整后的 WiFi 优先级大小分配 WiFi 资源。

6)在资源列表里删除已满足资源分配的用户,对于当前调度不满足资源分配的用户将进入下一轮分配。

3 网络资源分配相关性能指标

3.1 吞吐量

在异构网络系统中,衡量资源管理分配优劣性的一个重要指标是系统的吞吐量。假设系统包含 x 个 VLC 资源和 y 个 WiFi 资源,VLC 系统和 WiFi 系统的吞吐量^[6]可以分别表示为

$$T_{i,(VLC)_x}(t) = b_{(VLC)_x} \log_2 \left(1 + \frac{P_i^x |h_{i,VLC}|^2}{N_0 b_{(VLC)_x}} \right), x \in (1, m) \quad (7)$$

$$T_{i,(WiFi)_y}(t) = b_{(WiFi)_y} \log_2 \left(1 + \frac{P_i^y |h_{i,WiFi}|^2}{N_0 b_{(WiFi)_y}} \right), y \in (1, n) \quad (8)$$

其中, $T_{i,(VLC)_x}(t)$ 和 $T_{i,(WiFi)_y}(t)$ 分别表示第 i 个用户在第 x 个 VLC 资源块下和第 y 个 WiFi 资源块下的吞吐量, $b_{(VLC)_x}$ 、 $b_{(WiFi)_y}$ 分别为对应 VLC、WiFi 资源块带宽, $h_{i,VLC}$ 、 $h_{i,WiFi}$ 分别为 VLC、WiFi 信道增益, P_i^x 、 P_i^y 分别为第 i 个用户传输到第 x 个 VLC 资源块、第 y 个 WiFi 资源块的传输功率, N_0 为加性高斯白噪声的功率谱密度。

优先级高的用户会首先利用 VLC 资源。本文将 B 区域内的 VLC、WiFi 资源访问优先级适当调整,引入匹配因子 $I_{i,VLC}(t)$ 和 $I_{i,WiFi}(t)$ 。当 B 区域 VLC 访问优先级高于 WiFi 优先级时, $I_{i,VLC}(t)=1$, $I_{i,WiFi}(t)=0$; 反之 $I_{i,WiFi}(t)=1$, $I_{i,VLC}(t)=0$ 。因此,异构网络系统总吞吐量为

$$T(t) = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{x=1}^x I_{i,VLC}(t) T_{i,(VLC)_x}(t) + \sum_{y=1}^y I_{i,WiFi}(t) T_{i,(WiFi)_y}(t) \right] \quad (9)$$

其中, N 为用户的总数量。

3.2 资源利用率

在异构网络系统中,效用函数是指系统向用户分配资源后所获得的效用值。本文利用效用函数来衡量系统的偏好度,通过效用值可以直接反映出用户对于网络资源分配的利用效率。异构网络系统中的效用函数记为

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \left[\ln(p_{i,A(WiFi)}(t)+1) \right] +$$

$$\sum_{i=1}^N \left[I_{i,VLC}(t) \cdot \ln(p_{i,B(VLC)}(t)+1) + I_{i,VLC}(t) \cdot \ln(p_{i,B(WiFi)}(t)+1) \right] \quad (10)$$

其中, $p_{i,B(VLC)}(t)$ 表示 B 区用户获取 VLC 资源的优先级,而 $p_{i,A(WiFi)}(t)$ 、 $p_{i,B(WiFi)}(t)$ 分别表示 A、B 区用户获取 WiFi 资源的优先级。

3.3 公平性指数

本文使用 jain 公平指数来衡量异构网络系统的公平性。计算公式如下:

$$F = \left(\sum_{i=1}^N \frac{r_{i,get}}{r_{i,req}} \right)^2 \left/ \left(N \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{r_{i,get}}{r_{i,req}} \right)^2 \right) \right. \quad (11)$$

其中, F 是 jain 公平指数,取值范围为 $[1/N, 1]$, $r_{i,req}$ 为用户的平均分配带宽, $r_{i,get}$ 为用户分配到的带宽。 F 越大表示系统公平性越好,当 $F=1$ 时,系统达到绝对公平;当 $F=1/N$ 时,此情况为某一链路完全垄断信道资源,系统处于绝对不公平状态。

4 仿真结果与分析

本文使用 Matlab 软件平台从系统吞吐量、资源利用率、公平性指数 3 个方面对异构网络系统进行仿真,比较了动态 PF 算法、PF 算法、最大载干比(Max C/I)算法在帧数增加、信噪比增大、访问延迟概率提高的情况下性能。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

仿真参数及对应符号	值
A 区域内用户数/个	15
B 区域内用户数/个	30
VLC 接入点数/个	15
WiFi 接入点数/个	30(A、B 区域各一半)
调度周期/ms	5
时间段长度/ms	0.2
传输功率/mW	900±5
功率谱密度/mW	10^{-6}
调制方式	4 阶正交振幅调制(4QAM)
各子载波带宽/MHz	10

4.1 帧数增加时的性能分析

帧数增加时,系统吞吐量、资源利用率、公平性指数的变化情况如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出,动态 PF 算法的吞吐量比 PF 算法的吞吐量提升了约 20%,且远高于 Max C/I 算法,可以为用户提供更高的信号传输速率。而 Max C/I 算法吞吐量较低,将会导致信道质量差的用户无法有效

杨立伟, 王志立, 赖文聪, 等: 一种用于优化 VLC/WiFi 异构网络资源的动态比例公平算法

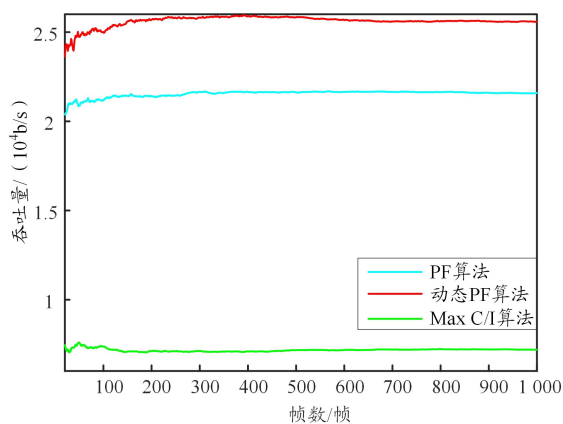
利用资源。从图 2(b)可以看出, PF 算法和动态 PF 算法的资源利用率非常高, 并且随着帧数的增加, 资源利用率稳定在 0.96 左右。Max C/I 算法的资源利用率始终接近 1。这表明 3 种算法都可以充分利用资源, 以保证更好的服务质量。从图 2(c)可以看出, 当帧数大于 20 时, 动态 PF 算法公平性指数达到 0.9 左右, 而 PF 算法在帧数增加到 600 时才能达到 0.85 左右, Max C/I

算法公平性指数则逐渐接近于 1。因此, Max C/I 算法可以确保系统更接近完全公平, 而 PF 算法与动态 PF 算法则无法满足用户对吞吐量的需求。

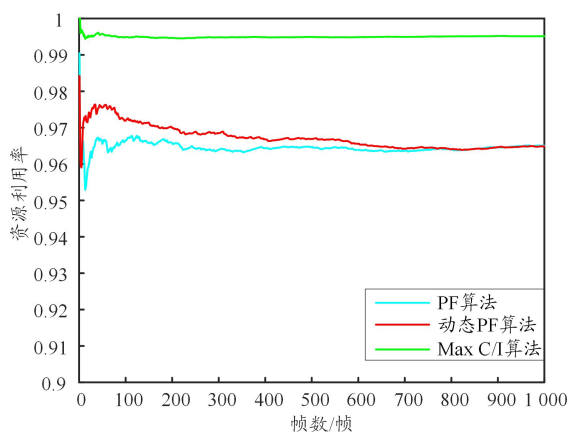
4.2 信噪比增加时的性能分析

信噪比增加时, 系统吞吐量、资源利用率、公平性指数的变化情况如图 3 所示。

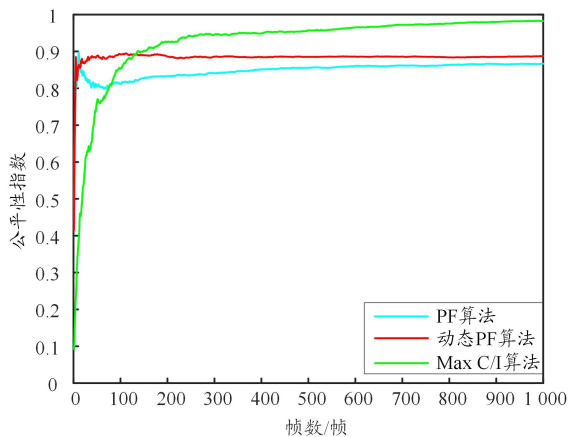
从图 3(a)可以看出, 在各种信噪比情况下, 动态 PF 算法的吞吐量略高于 PF 算法, 且随着信噪比增加而增加, Max C/I 算法的吞吐量始终保持在 0.8×10^4 b/s 左右, 远小于前 2 种算法。这表明动态 PF 算法可以为系统用户提供更高的信号传输速率。从图 3(b)可以看出, 动态 PF 算法与 PF 算法的资源利用率基本相同, 均可达到 0.99, 而 Max C/I 算法的资源利用率稳定在 0.97 左右, 这表明这 3 种算法都可以为用户带来较好的体验。从图 3(c)可以看出, 动态 PF 算法的公平性指数在 0.97 上下波动, 而 PF 算法的公平性指数始终低于 0.97, Max C/I 算法公平性指数则始终低于 0.9。因此, 在各种信噪比情况下, 动态 PF 算法都能实现更好的公平性。



(a) 吞吐量

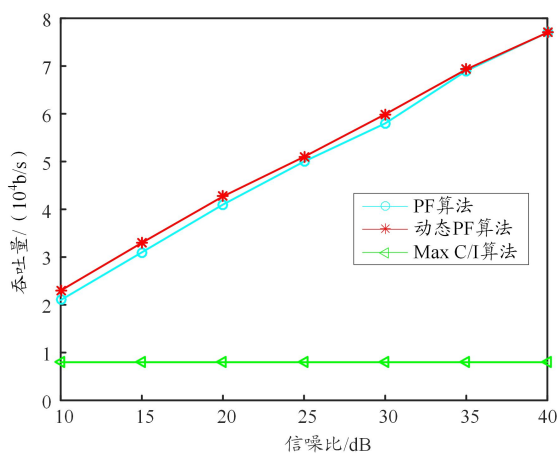


(b) 资源利用率

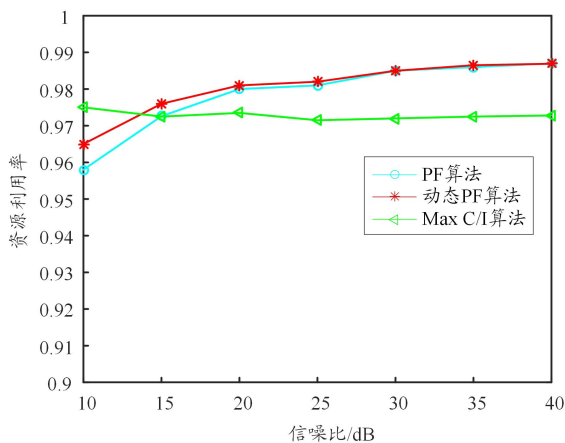


(c) 公平性指数

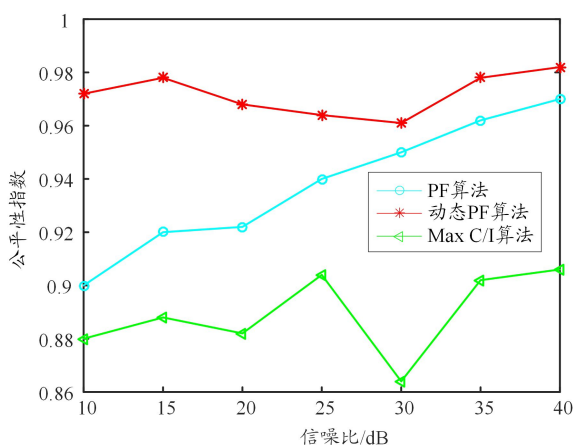
图 2 帧数增加时, 系统吞吐量、资源利用率、公平性指数的变化情况



(a) 吞吐量



(b) 资源利用率



(c) 公平性指数

图3 信噪比增加时,系统吞吐量、资源利用率、公平性指数的变化情况

4.3 访问延迟概率增加时的性能分析

在异构网络系统的分析中,另一个重要指标是访问延迟概率,延迟概率越小表明系统性能越好^[7-8]。当可容忍延迟增加时,访问延迟概率的变化情况如图4所示。可以看出,随着可容忍延迟的增加,3种算法的访问延迟概率都下降,但在相同的可容忍延迟下,Max C/I算法的访问延迟概率高于动态PF算法和PF算法。并且,随着可容忍延迟的逐渐增加,动态PF算法的访问延迟概率从0.17降低到0。因此,在3种算法中,动态PF算法的延迟性能最佳。

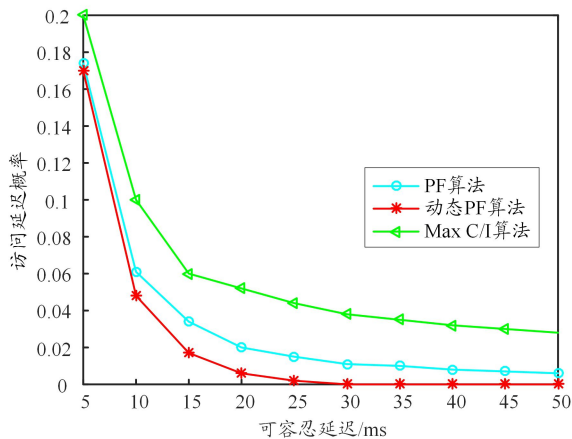


图4 访问延迟概率变化情况

5 结束语

本文基于 VLC/WiFi 异构网络系统资源分配中的 PF 算法,提出了一种动态 PF 算法。该算法通过引入补偿因子 α 来优化用户的优先级,根据用户优先级分配相应资源,有效降低了用户访问延迟。仿真结果表明:与 PF 算法、Max C/I 算法相比,动态 PF 算法不仅提高了用户通信速率,还充分地分配了资源,并且具有更好的延迟性能,从而可以为用户提供更稳定的服务。

参考文献:

- [1] ALENEZI A M, HAMD I K A. Reinforcement learning approach for content-aware resource allocation in hybrid Wi-Fi-VLC networks[C]//2021 IEEE 93rd Vehicular Technology Conference (VTC2021-Spring), April 25–28, 2021, Helsinki, Finland. Helsinki: IEEE, 2021: 1–5.
- [2] LIU C, GUO C, YANG Y, et al. Optimization of user selection and bandwidth allocation for federated learning in VLC/RF systems[C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), April 10–13, 2022, Nanjing, China. Nanjing: IEEE, 2021: 1–6.
- [3] GOKARN I, MISRA A. Adaptive & simultaneous pervasive visible light communication and sensing [C]//2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops), March 22–26, 2021, Kassel, Germany. Kassel: IEEE, 2021: 344–347.
- [4] MAI V V, THANG T C, PHAM A T. CSMA/CA-based uplink MAC protocol design and analysis for hybrid VLC/Wifi networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 21–25, 2017, Paris, France. Paris: IEEE, 2017: 457–462.
- [5] KUMAR N, AHMAD A, AWASTHI S, et al. Parameter aware utility proportional fairness scheduling technique in a communication network[J]. International Journal of Innovative Computing and Applications, 2021, 12 (2–3): 98–107.
- [6] YANG Y C, LEE W T, CHEN C H. A weighted fair queue management on DOCSIS multi-downstream channels[J]. Journal of Internet Technology, 2021, 22(5): 1033–1054.
- [7] SHAO S, KHREISHAH A, AYYASH M, et al. Design and analysis of a visible-light-communication enhanced WiFi system [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(10): 960–973.
- [8] NGO K T, MANGIONE S, TINNIRELLO I. Exploiting EDCA for feedback channels in hybrid VLC/WiFi architectures [C]//2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedCom-Net), June 15–17, 2021, Ibiza, Spain. Ibiza: IEEE, 2021: 1–6.